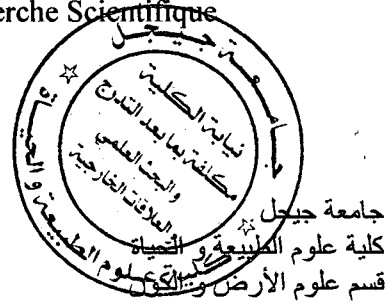


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

551/15



Université de Jijel
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers



Mémoire

Présenté par :

Djelel BOUTI

Pour l'obtention du diplôme de

Magister

Filière : Géologie

Option : Géologie Appliquée

Thème

Etude du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé Application à la région de Tébessa (NE Algérien)

Soutenu publiquement le 16 / 11 / 2014

devant le jury composé de :

Président : BOUZENOUNE Azzedine

Professeur

Université de Jijel

Rapporteur : DEBIECHE Taha-Hocine

MCA

Université de Jijel

Examineurs : BAALI Fethi

Professeur

Université de Tébessa

CHABOUR Nabil

MCA

Université de Constantine

Invité : GUEFAIFIA Omar

MCB

Université de Tébessa

Année universitaire 2013/2014

Numéro d'ordre :

AVANT-PROPOS

Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire de Magister ont été réalisés dans le cadre de l'accord programme de coopération CMEP (Comité Mixte d'Evaluation et de Prospective Franco-Algérien) numéro 11 MDU 850 qui relie le Laboratoire de Génie Géologique (Université de Jijel - Algérie) et le Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (Université de Nantes – France).

La réalisation de la partie pratique et théorique de ce mémoire de Magister a été faite en collaboration entre :

- le Laboratoire de Génie Géologique (Université de Jijel - Algérie) ;
- le Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (Université de Nantes – France) ;
- le Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (Université de Guelma).

Le financement de ma formation a été fait par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique de l'Algérie, par une bourse d'étude de 3 ans.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont encouragé à suivre cette formation et de m'avoir aidé dans mes études, que Dieu leur accorde la santé et le bonheur.

A mon encadrant Dr. Taha-Hocine Debieche

A ceux qui pensent à moi

Mes très chères sœurs Ouafa et Hala

A mes cousins : Mohamed Amine, Abd El Razak, Nasser El Dine.

A mes amis : Ayoub et Riad.

A Tous mes enseignants dès le primaire jusqu'à l'université

A Toute la promotion du magister « Géologie Appliquée ».

A tous qui m'ont aidé à réaliser ce travail

Et à tous qui sacrifient leur temps au bien être de l'humanité et de la science

A vousmerci.

BOUTI Djelel

Remerciements

Je remercie Allah le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et la patience pour réaliser ce modeste travail.

Ma profonde gratitude s'adresse avant tout au Dr. Taha-Hocine Debieche, mon encadrant, qui a accepté de diriger mon travail et m'a accordé tout son attention et sa patience pour l'accomplir.

Mes vifs remerciements s'adressent au corps des enseignants, pour le soutien qu'ils m'ont apporté lors de la préparation de ce mémoire et les conseils avisés qu'ils ont su me donner tout au long de ma post-graduation, notamment le Pr. Azzedine Bouzenoune, l'enseignant Kamel Boufaa (Université de Constantine) et le Dr. Omar Guefaïfia (Université de Tébessa).

Mes vifs remerciements au Pr. Eric Mercier (Université de Nantes – France), responsable du projet Tassili (partie française), pour sa participation active dans ce travail, ses conseils éclairés et sa disponibilité lors de mes séjours scientifiques à l'Université de Nantes.

J'exprime également mes vifs remerciements aux enseignants qui m'ont fait l'honneur de juger ce travail :

Monsieur : BOUZENOUNE Azzedine : enseignant-chercheur à l'université de Jijel

Monsieur : BAALI Fethi : enseignant-chercheur à l'université de Tébessa.

Monsieur : CHABOUR Nabil : enseignant-chercheur à l'université de Constantine 1.

Et à tout le personnel administratif de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.

Je remercie le Dr. Amar Maoui (Université de Guelma) de m'avoir autorisé à accéder à son laboratoire (Laboratoire d'Hydraulique et de Génie Civil, Université de Guelma) pour faire mes analyses chimiques, je remercie également son Doctorant Yacine G. (Université de Guelma) pour le soutien qu'il m'a apporté pour réaliser ces analyses chimiques.

Je remercie également le personnel de l'ANRH de Constantine et de Tébessa ainsi que la DHW de Tébessa.

Mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Abstract

The potential of carbonate aquifers in water depends mainly fracturing, hydrodynamic characteristics, the degree of dissolution and the geometry (syncline and anticline), geological formations. In order to understand the relationship between these parameters, this study was conducted on the pleated aquifer system d'Ain-Dalaa – Bir-Mokadam (the north-east of Algeria). Quarterly monitoring of hydrodynamics and water chemistry (wells, piezometers and source) was conducted during the period from April 2013 to February 2014.

The geological data, structural and geophysical allowed us to show the existence of three aquifers (Mio-Plio-Quaternary, Eocene and Maastrichtian) in the study area. The calculation of water balance, we concluded that the groundwater recharge is mainly through the cracks. The hydrodynamic monitoring and fracturing of the study area, allowed us to illustrate the flow of water in the aquifer, in two direction (parallel and perpendicular) to the axis of folding and faulting in the direction of several conceptual models have been addressed. Hydrodynamic responses drilling have enabled us to detect areas of high and low cracking. The chemical signature of water has shown other inflows aquifer system as well as tracking and origin of the water.

Résumé

Le potentiel des aquifères carbonatés en eaux dépend principalement de la fracturation, des caractéristiques hydrodynamiques, du degré de la dissolution et de la géométrie (synclinal et anticlinal) des formations géologiques. Afin de comprendre la relation existante entre ces paramètres, cette étude a été menée sur le système aquifère plissé d'Ain-Dalaa – Bir-Mokadam (NE algérien). Un suivi trimestriel de l'hydrodynamique et de la chimie des eaux (forages, piézomètres et source) a été réalisé durant la période d'avril 2013 à février 2014.

Les données géologique, structurale et géophysique nous ont permis de montrer l'existence de trois aquifères (Mio-plio-quaternaire, Eocène et Maestrichtien) dans la zone d'étude. Le calcul du bilan hydrique, nous a permis de conclure que la recharge de la nappe se fait principalement à travers les fissures. Le suivi hydrodynamique et la fracturation de la zone d'étude, nous ont permis d'illustrer l'écoulement des eaux dans l'aquifère, selon deux directions (parallèle et perpendiculaire) à l'axe du plissement ainsi que selon la direction des failles ; plusieurs modèles conceptuels ont été dressés. Les réponses hydrodynamiques des forages nous ont permis de détecter des zones à forte et à faible fissurations. La signature chimique des eaux, a permis de montrer d'autres apports d'eau du système aquifère ainsi que le cheminement et l'origine des eaux.

ملخص

القدرة المائية للحجر الكلسي تتعلق أساسا بالتشققات, الخصائص الهيدروديناميكية, درجة الذوبان, وشكل الطبقات الجيولوجية (الطية المقعرة و الطية المحدبة). لفهم العلاقة الموجودة بين هذه الخصائص أنجزت دراسة حول الخزان المائي المطوي (المتموج) لعين دلعة وبنر مقدم. دراسة هيدروديناميكية و هيدروكيميائية متواصلة للمياه (آبار عميقة 'منبع (أنجزت أثناء الفترة الممتدة بين شهر أفريل 2013 و فيفري 2014.

المعطيات الجيولوجية، البنيوية و الجيوفيزيائية سمحت لنا بآ ثبات وجود ثلاث خزانات مائية جوفية (العصر الثلاثي المتوسط – الدهر الرابع، العصر الفجري، الميسريخي) في منطقة الدراسة. حساب الموازنة المائية سمح لنا باستخلاص أن إعادة تعبئة الطبقات الحاملة للمياه يتم عن طريق التشققات. الدراسة الهيدروديناميكية المتواصلة و التشققات سمحت لنا برسم حركة المياه حسب اتجاهين (موازي و عمودي) بالنسبة لمحور الطية و كذلك حسب اتجاه الصد و ع، العديد من النماذج التصورية أنجزت؛ الاستجابة الهيدروديناميكية للآبار العميقة سمحت لنا بكشف مناطق كثيفة و قليلة التشققات. البصمة الكيميائية للمياه كشفت وجود مصادر و طرق مختلفة للمياه.

Table de matières

Avant-propos.....	I
Dédicace.....	II
Remerciements.....	III
Résumé.....	IV-V
Table des matières	VI-VIII
Liste des figures.....	IX-XI
Liste des tableaux.....	XII

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Rappel bibliographique

I.1. Définition du karst.....	2
I.2. Formation du karst.....	2
I.3.1. L'épikarst.....	3
I.3.2. La zone non saturée.....	3
I.3.3. La zone noyée.....	3
I.4. Classification des aquifères karstiques.....	4
I.4.1. Aquifères carbonatés fissurés et karstifiés.....	4
I.4.2. Systèmes karstiques au sens strict.....	4
I.4.3. Systèmes karstiques non fonctionnels.....	5
I.5. Relation plissement fractures.....	5
I.5.1. Les modes d'initiation du plissement.....	5
I.5.2. Relations directionnelles plissement/fracturation.....	6
I.6. Démarche des études des aquifères karstiques.....	9
I.6.1. Identification.....	9
I.6.2. Caractérisation.....	9
I.7. Conclusion.....	9-10

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Situation géographique et conditions climatologiques.....	11
II.1.1. Situation géographique.....	11
II.1.2. Caractéristiques climatologiques de la zone d'étude.....	12
II.1.2.1. Précipitations.....	13
II.1.2.2. Températures.....	15
II.1.2.3. L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	16
II.1.2.4. Bilan hydrologique.....	17
a) Calcul de la RFU.....	18
b) Calcul du bilan hydrologique.....	18
c) Décomposition de l'excès d'eau (WS).....	20
Ruissellement.....	20
Infiltration.....	20
II.1.3. Conclusion.....	20
II.2. Géologie de la zone d'étude.....	21
II.2.1. Introduction.....	21
II.2.2. Stratigraphie.....	22
II.2.2.1. Trias.....	22
II.2.2.2. Crétacé.....	23

II.2.2.2.1. Cénomaniens.....	23
II.2.2.2.2. Turonien.....	23
II.2.2.2.3. Coniacien – Santonien.....	23
II.2.2.2.4. Campanien.....	23
II.2.2.2.5. Maestrichtien.....	23
II.2.2.3. Paléogène.....	23
II.2.2.3.1. Paléocène (Dano-Montien).....	23
II.2.2.3.2. Paléocène – Eocène (Thanétien à Yprésien).....	23
II.2.2.3.3. Lutétien.....	24
II.2.2.4. Quaternaire.....	24
II.2.2.4.1. Villafranchien.....	24
II.2.2.4.2. Glacis polygéniques nappant les reliefs.....	24
II.2.2.4.3. Alluvions actuelles et récentes.....	24
II.2.3. Tectonique.....	24
II.2.4. Intérêt hydrogéologique des formations géologiques et de la tectonique de la région.....	28
a) L'aquifère des calcaires maestrichtiens.....	29
b) L'aquifère des calcaires éocène.....	29
c) L'aquifère Mio-Plio-Quaternaire.....	30
II.2.5. Conclusion.....	30
II.3. Etude géophysique.....	31
II.3.1. Introduction.....	31
II.3.2. Etude géophysique de la région de Gourrigueur (ex. Dalaa).....	31
II.3.2.1. Introduction.....	31
II.3.2.2. Répartition des sondages électriques.....	31
II.3.2.3. Résultats de l'étude géophysique.....	32
II.3.2.4. Coupes géoélectriques.....	33
II.3.2.5. Cartes de résistivités.....	48
II.3.2.5.5. Carte de la côte du toit de la formation résistante profonde.....	44
II.3.3. Etude géophysique de la région de Bir Mokadam.....	46
II.3.3.1. Interprétation des coupes géoélectriques.....	46
a) Formation anté-miocène.....	46
b) Recouvrement.....	47
II.3.4. Conclusion.....	48

Chapitre III : Matériel et méthodes

III.1. Introduction.....	49
III.2. Suivi spatio-temporel.....	49
III.2.1. Choix des stations de mesures.....	49
III.2.2. Choix du pas temps du suivi.....	50
III.3. Positionnement géographique des points d'eau.....	50
III.4. Mesure du niveau piézométrique.....	51
III.5. Prélèvement d'eau.....	52
III.6. Conservation des échantillons.....	52
III.7. Mesures des paramètres physicochimiques et des éléments chimiques.....	52
III.7.1. Les paramètres physico-chimiques.....	52
III.7.2. Analyse des éléments chimiques.....	52
III.7.2.1. Méthode titrimétrie.....	52
a) Détermination de la dureté totale.....	52
b) Détermination du calcium.....	53

c) Détermination des chlorures.....	53
d) Détermination des bicarbonates (HCO_3^-).....	53
e) Détermination des sulfates (SO_4^{2-}).....	53
f) Détermination du Magnésium.....	54
g) Détermination du sodium et potassium.....	54
8. Logiciels.....	54

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Fonctionnement hydrodynamique du système aquifère.....	56
IV.2.1. Introduction.....	56
IV.2.2. Fonctionnement hydrodynamique dans la zone d'étude.....	56
IV.2.3. Fonctionnement hydrodynamique au niveau local.....	60
IV.2.3.1. Synclinal de Chéria (zone de Bir Mokadam).....	60
IV.2.3.2. Synclinal de Gourrigueur (ex. Ain Dalaa).....	64
IV.2.3.2.1. Fonctionnement hydrodynamique entre les piézomètres Pz-AD2-G et PZ-AD2-T.....	65
IV.2.3.2.1. Fonctionnement hydrodynamique de la source de l'Ain-Dalaa.....	67
IV.2.3.3. Bassin de Meskiana.....	71
IV.2.4. Conclusion.....	73
IV.3. Etude hydrochimique.....	74
IV.3.1. Introduction.....	74
IV.3.2. Localisation des points d'eau.....	74
IV.3.3. Analyse statistique des données hydrochimiques.....	74
IV.3.3.1. Analyse élémentaire.....	75
IV.3.3.2. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	77
IV.3.3.2.1 Première ACP.....	77
IV.3.3.2.1.1 La Variances des axes.....	77
IV.3.3.2.1.2 Projection des variables et des individus.....	78
IV.3.3.2.2. La deuxième ACP.....	80
IV.3.4. Faciès chimiques des eaux.....	82
IV.3.4.1. Diagramme de Piper.....	82
IV.3.4.2. Diagramme de Schoeler Berkaloff.....	84
IV.3.5. Evolution spatio-temporelle de la chimie des eaux.....	86
IV.3.6. Origine des éléments chimiques.....	89
IV.3.6.1. Couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$	89
IV.3.6.2. Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$	89
IV.3.6.3. Couple Ca^{2+} et $\text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^-$	90
IV.3.6.4. Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$ et SO_4^{2-}	91
IV.3.6.5. Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{SO}_4^{2-}$	92
IV.3.7. Conclusion.....	93
Conclusion générale et recommandations.....	94
Bibliographie.....	95-97
Annexes.....	98-108

Liste des figures

01	Schéma d'un aquifère karstique (Bakalowicz, 1999 d'après Mangin, 1975).....	02
02	Illustration d'un aquifère épikarstique (Mangin, 1975).....	03
03	Schéma conceptuel de l'aquifère karstique selon une approche fonctionnelle (modifié à partir de Mangin, 1975) (In Dörfliger et al 2010).....	04
04	Les trois principaux mécanismes de plissement dans les roches (d'après Suppe, 1985).....	05
05	Illustration schématique de la terminologie utilisée classiquement pour décrire les relations directionnelles entre fractures et plis (in Bazalgette (2004)).....	06
06	Le modèle d'intrados / extrados (d'après Ramberg, 1964).....	07
07	Modèle classique de distribution des fractures au sein d'un anticlinal idéalisé inspiré du Teton Anticline, Montana, U. S. A (In Bazalgette (2004)).....	07
08	Distribution des contraintes locales et de la fracturation associées à trois types de plis différents (dans des monocouches).....	08
09	Origines mécaniques possibles des failles normales axiales.....	08
10	Situation géographique de la zone d'étude.....	11
11	Situation hydrographique de la zone d'étude.....	12
12	Situation géographique des trois stations pluviométrique par rapport à la zone d'étude.....	13
13	Evolution interannuelle des précipitations dans les trois stations (1988-2010).....	14
14	Cumul des précipitations annuelles pour les trois stations.....	14
15	Evolution de la précipitation moyenne mensuelle (1988 – 2010).....	15
16	Variation de la température moyenne mensuelle (1988 – 2010).....	16
17	Bilan hydrologique à la station de Dalaa.....	18
18	Bilan hydrologique à la station de Meskiana.....	19
19	Bilan hydrologique à la station de Chéria.....	19
20	Position de la zone d'étude et des quatre cartes géologiques.....	21
21	Position et carte géologique du synclinal d'Ain Dalaa.....	23
22	Esquisse tectonique de la région de l'Ain Dalaa.....	25
23	Coupes géologiques selon la direction NW-SE sur la partie nord-ouest de la zone d'étude.....	27
24	Coupe géologique selon la direction WNW-ESE.....	28
25	Répartition des sondages électriques modifiée (in BEREGH (2007)).....	32
26	Coupe géoélectrique (Profil I) modifiée (in BEREGH (2007)).....	33
27	Coupe géoélectrique (Profil II) modifiée (in BEREGH (2007)).....	34
28	Coupe géoélectrique (Profil III) modifiée (in BEREGH (2007)).....	35
29	Coupe géoélectrique (Profil IV) modifiée (in BEREGH (2007)).....	36
30	Coupe géoélectrique (Profil V) modifiée (in BEREGH (2007)).....	37
31	Semi-variogramme AB = 300 m.....	38
32	Carte iso-résistivité AB = 300 m.....	39
33	Semi-variogramme AB = 600 m.....	40
34	Carte iso-résistivité AB = 600 m.....	40
35	Semi-variogramme AB = 1000 m.....	41
36	Carte iso-résistivité AB = 1000 m.....	42
37	Semi-variogramme AB = 2000 m.....	43
38	Carte iso-résistivité AB = 2000 m.....	43
39	Semi-variogramme du toit de la formation résistante profonde.....	44
40	Carte de la côte du toit de la formation résistante profonde.....	45
41	Répartition des sondages électriques (CGG 1970) (In Chamekh K. (2011)).....	46
42	Coupe géoélectrique H modifiée (In CGG 1970).....	46
43	Coupe géoélectrique (Profil J) modifiée (In CGG 1970).....	47
44	Coupe géoélectrique E modifiée (In CGG 1970).....	47
45	Position des points d'eau sur l'image de Google Earth.....	51

46	Rosace des fissures dans le flanc Sud Est du synclinal de Gourrigueur.....	57
47	Décrochement sénestre dans le flanc Sud Est du synclinal Gourrigueur	57
48	Modèle conceptuel pour le fonctionnement hydrodynamique dans des calcaires plissés et fissuré (axial et longitudinal).....	58
49	Coupe hydrogéologique.....	59
50	Evolution spatio-temporelle du niveau piézométrique dans les points d'eau de la coupe hydrogéologique qui traverse la zone d'étude selon la direction WNW-ESE.....	59
51	Localisation des zones locales sur la zone d'étude.....	60
52	Position et caractéristiques des points d'eau sur le flanc NW du synclinal de Chéria (région de Bir Mokadam).....	61
53	Evolution spatio-temporelle du niveau piézométrique durant les mois de Juin et Septembre 2013.....	62
54	Evolution spatio-temporelle du niveau piézométrique durant les mois de Juin et Septembre 2013.....	63
55	Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique dans le flanc de Bir-Mokadam et le synclinal de Chéria (période de Juin ; septembre 2013).....	64
56	Vue satellitaire du flanc NW du synclinal Ain Dalaa.....	65
57	Coupe transversale du synclinal de Gourrigueur (ex Ain Dalaa).....	65
58	Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace (Avril, juin, Septembre 2013 et Février 2014).....	66
59	Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique du synclinal de Gourrigueur (ex Ain Dalaa).....	67
60	Carte géologique de la bordure Ouest du synclinal de Gourrigueur.....	68
61	Coupe géologique montrant la base du Maestrichtien (G. Durozoy 1952).....	69
62	Coupe géologique passant par la Source de l'Ain Dalaa (G. Durozoy 1952).....	69
63	Evolution du débit de la source d'Ain Dalaa en fonction des précipitations (G. Durozoy 1952).....	70
64	Position et caractéristiques des points d'eau dans le bassin de Meskiana.....	71
65	Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace (Juin, Septembre 2013).....	72
66	Modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique dans les formations calcaires du Turonien (bassin de Meskiana).....	72
67	Situation géographique des points d'eau de prélèvement.....	74
68	Variance des axes (ACP 1).....	78
69	Projection des variables et des individus sur les axes 1 et 2 (ACP 1).....	79
70	Projection des variables et des individus sur les axes 1 et 2 (ACP 2).....	81
71	Présentation des points d'eau sur le diagramme Piper.....	82
72	Projection des points d'eau sur le losange par forage.....	83
73	Présentation de 14 points d'eau sur le diagramme de Schoeler Berkaloff.....	84
74	Présentation de 14 points d'eau sur le diagramme de Schoeler Berkaloff.....	85
75	Position du profil sur la zone d'étude.....	86
76	Evolution spatio-temporelle des paramètres physiques de l'eau de la zone d'étude.....	87
77	Evolution spatio-temporelle des éléments chimiques dissouts dans l'eau de la zone d'étude.....	88
78	Rapport caractéristique entre $(Na^+ + K^+)$ et Cl^-	89
79	Rapport caractéristique entre Ca^+ et HCO_3^-	90
80	Rapport caractéristique entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ et HCO_3^-	91
81	Rapport caractéristique entre Ca^+ et $(HCO_3^- + SO_4^{2-})$	92
82	Rapport caractéristique entre Ca^+ et SO_4^{2-}	93

Liste des photos

Photo 1 : Synclinal de Gourrigueur.....	25
Photo 2 : Fissuration dans les formations géologique de l'Eocène et du Maestrichtien.....	26
Photo 3 : GPS MAP 62 S.....	50
Photo 4 : Sonde lumineuse.....	51
Photo 5 : Multiparamètres 350i.....	52
Photo 6 : Matériel utilisé dans la méthode titrimétrie.....	53
Photo 7 : Spectrophotomètre.....	54
Photo 8 : Distribution de la fissuration (flanc NW du synclinal de l'Ain Dalaa).....	56
Photo 9 : Source d'Ain Dhalaa (Google Earth 2014).....	67

Liste des tableaux

01	Estimations des températures moyennes mensuelles par le modèle de BNEDER.....	16
02	Résultat du calcul de l'ETP (station de Dalaa).....	17
03	Résultat du calcul de l'ETP (station de Meskiana).....	17
04	Résultat du calcul de l'ETP (station de Chéria).....	17
05	Ruissellement et infiltration dans les stations de Chéria, Dalaa et Meskiana.....	20
06	Log hydro-lithostratigraphique des formations géologiques.....	29
07	Gamme des résistivités adaptée par le BERECH (2007).....	32
08	Caractéristiques des points d'eau.....	49
09	Statistique élémentaire.....	75
10	Matrice de corrélations.....	76
11	Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques.....	76

Introduction générale

Introduction générale

L'étude des aquifères du milieu fracturé présente souvent des difficultés, vu que ce milieu est souvent discontinu, l'orientation et la taille de ses fissures sont très variables, la répartition et l'intensité spatiale des fissures sont variables d'une zone à une autre en fonction de la tectonique (plissement, failles...) et de la nature lithologique des formations géologiques (calcaire, dolomite, calcaire marneux...). Pour étudier ce type d'aquifère ont fait appel à plusieurs approches, on citera ci-dessous les plus utilisés :

- Géologique pour connaître la nature des formations géologiques et l'historique tectonique de la zone d'étude ;
- Géophysique pour déterminer la géométrie du système aquifère dans le sous-sol ;
- Hydrodynamique pour faire la relation entre le débit d'écoulement et/ou la vitesse de la circulation des eaux et la taille des fissures et/ou l'intensité de la fissuration dans une zone ; l'action hydrodynamique (pluie, pompage...) et la réponse hydrodynamique de l'aquifère... ;
- Hydrochimique en utilisant la composition chimique (éléments majeurs, éléments traces, isotopes...) pour connaître l'origine des eaux, les formations géologiques traversées, le temps de séjour de l'eau.

Le système aquifère de la région de Bir-Mokadam - Ain-Dalaa est caractérisé par l'existence de plusieurs couches (Eocène, Maestrichtien et Turonien), une succession de plissement et un réseau de faille qui traverse ses couches, cela favorise la constitution des aquifères intéressants, vu l'existence des synclinaux qui aident à accumuler l'eau et les failles qui favorisent des écoulements préférentiels en fonction de la taille des fissures.

Pour étudier le fonctionnement hydrodynamique de cet aquifère, nous avons réparti notre travail dans les chapitres ci-dessous :

- Rappel bibliographique : dont lequel nous donnons un aperçu général sur les systèmes aquifères dans le milieu fissuré ainsi que les différentes méthodes utilisées pour l'étudier ;
- Présentation de la zone d'étude : dans ce chapitre, nous présentons le site du point de vue géographique, hydrologique, géologique et géophysique. Cela nous permettra de bien voir la localisation de la zone d'étude, la composition et la géométrie du système aquifère ;
- Matériels et méthodes : nous présentons ici les différents équipements scientifiques et les méthodes scientifiques utilisées pour réaliser ce travail ;
- Résultats et discussions : dans ce chapitre, on présentera les résultats hydrodynamiques et hydrochimiques et on discutera les hypothèses proposées pour le fonctionnement hydrodynamique de la zone d'étude ;
- Conclusion générale et recommandations : dans cette dernière partie, nous présentons les résultats essentiels obtenus de cette étude et les recommandations que nous proposons pour bien approfondir cette étude dans les futurs travaux de recherche.

Chapitre I

Rappel bibliographique sur les milieux fissurés et karstiques

I.1. Définition du karst

Le nom karst dérive des termes locaux « Carso » et « Kras » qui désigne la région autour de Trieste et des montagnes Dinariques de Slovénie où fut décrit ce milieu caractéristique (De Waele et al., 2008, in Gerbaux . 2009).

Le karst est une structure géomorphologique résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique de formations de roches carbonatées, principalement de formations calcaires. Des phénomènes d'érosion de type karstique se manifestent aussi dans des structures « pseudokarstiques » (wikipédia)

I.2. Formation du karst

Les aquifères karstiques résultent d'un processus complexe de karstification et d'évolution au cours du temps. La karstification se fait par dissolution des roches carbonatées ou sulfatées au contact de l'eau chargée en acide carbonique (H_2CO_3), qui dérive du gaz carbonique de l'air, plus rarement de gaz carbonique d'origine profonde (associé à de l'hydrothermalisme). La dissolution de la roche calcaire par l'eau associée au gaz carbonique fait intervenir de nombreux paramètres physicochimiques dans un ensemble de réactions qui peut être simplifié ainsi (Dörfliger et al. 2010):



L'eau chargée en gaz carbonique dissout ainsi le carbonate de calcium de la roche pour former un sel dissous de bicarbonate de calcium qu'elle transporte et évacue vers les cours d'eau. Elle élargit progressivement les vides initiaux dans lesquels elle circule, en façonne les parois et les agrandit jusqu'à créer de véritables chenaux qui facilitent l'infiltration et accentuent le processus amorcé (Dörfliger et al. 2010).

I.3. Composition du Karst

De point de vu hydrogéologique le karst est composé de trois zones (Figure 1) (Salomon 2006, in Gerbaux. 2009) :

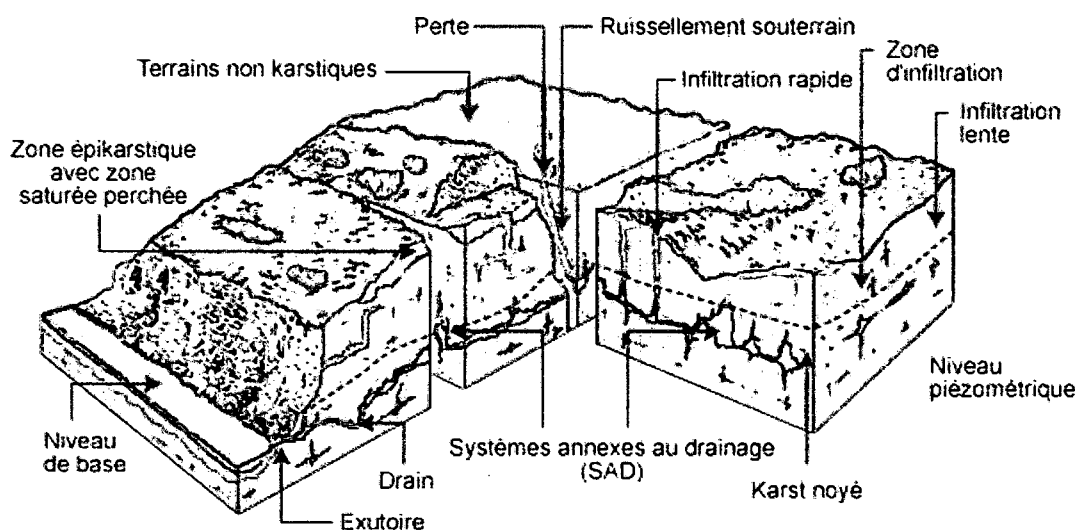


Figure 1 : Schéma d'un aquifère karstique (d'après Mangin, 1975 in Bakalowicz, 1979)

I.3.1. L'épikarst

Représente la partie la plus proche de la surface, elle est épaisse de quelques mètres à quelques dizaines de mètres (Figure 2). Les phénomènes d'altération y sont très importants, en particulier la dissolution. Cette zone rassemble l'eau d'infiltration dans une nappe perchée locale et discontinue, drainée vers le bas soit par les vides les plus larges en un ruissellement souterrain rapide, soit par les vides de petites dimensions, en une infiltration lente écoulant un mélange d'air et d'eau (Dörfliger et al., 2010).

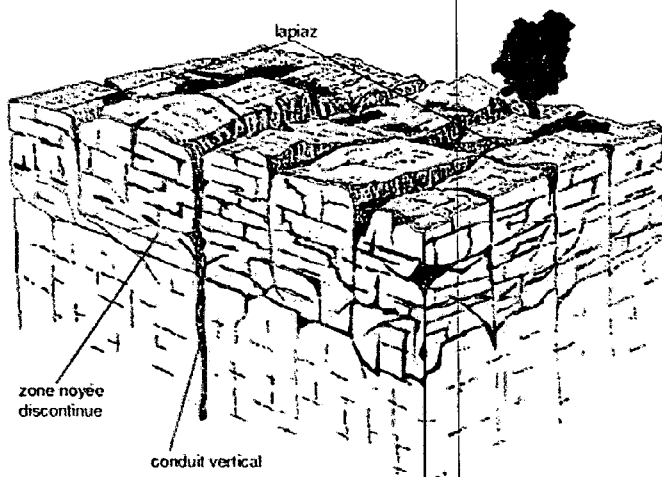


Figure 2 : Illustration d'un aquifère épikarstique (Mangin, 1975)

I.3.2. La zone non saturée (ZNS) (Zone d'infiltration)

La zone d'infiltration est constituée par la partie non saturée de l'aquifère au sein de laquelle des écoulements lents prennent place dans les fines fissures et des écoulements rapides au niveau de conduits verticaux plus ou moins connectés au réseau de conduits karstiques de la zone noyée (Dörfliger et al., 2010).

I.3.3. La zone noyée (Zone saturée)

La zone noyée se développe principalement à l'aval, sans nécessairement s'étendre à l'ensemble d'un massif. Elle s'organise autour d'un axe de drainage ou d'un réseau de conduits karstiques en relation avec la roche encaissante, fissurée et pouvant comprendre des vides de grande taille organisés en ensembles individualisés, dénommés « systèmes annexes au drainage » par Mangin. Ces « systèmes annexes au drainage » sont en connexion hydraulique avec les conduits du réseau de drainage souterrain (Dörfliger et al., 2010).

Le fonctionnement hydrodynamique entre les trois zones est résumé par le schéma suivant (Figure 3) :

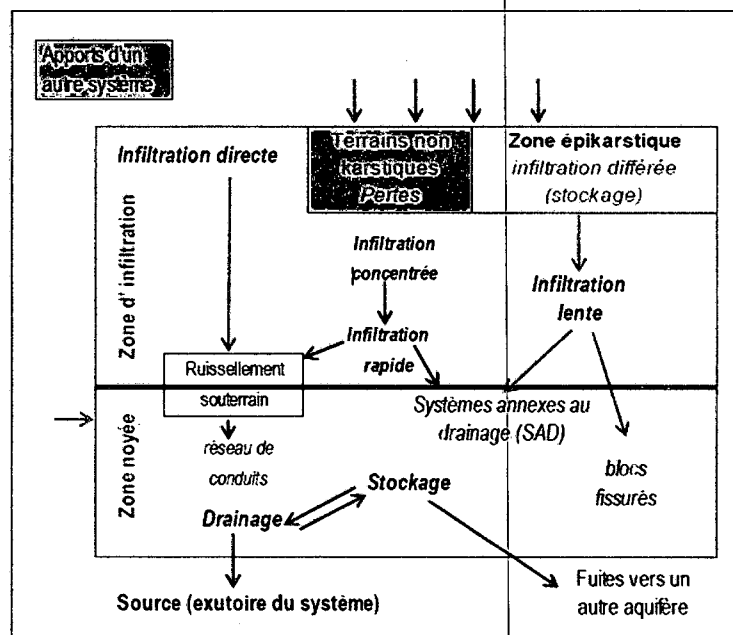


Figure 3 : Schéma conceptuel de l'aquifère karstique selon une approche fonctionnelle (modifié à partir de Mangin, 1975 in Dörfliger et al., 2010)

I.4. Classification des aquifères karstiques

Une classification des aquifères karstiques a été réalisée en se basant sur leur degré de karstification et leur fonctionnalité (Marsaud, 1997, in Dörfliger et al., 2010) :

I.4.1. Aquifères carbonatés fissurés et karstifiés

Il s'agit des systèmes en cours d'évolution dont l'organisation n'est pas encore perceptible et qui peuvent être assimilés du point de vue de leur comportement hydraulique à des aquifères fissurés. Ce type englobe également les réservoirs présentant une porosité matricielle (craie et dolomies) drainée par des fractures karstifiées ou non. Il peut exister une dissociation des fonctions capacitives (stockage dans le milieu fissuré ou poreux) et transmissives (réseau de fractures karstifiées plus ou moins organisées) en fonction de l'évolution du milieu et du maillage de la fracturation.

I.4.2. Systèmes karstiques au sens strict

Ce sont les systèmes karstiques fonctionnels dans lesquels vides et écoulements sont organisés. Il en résulte des caractéristiques qui les rendent spécifiques par rapport aux autres milieux (Mangin, 1975 et 1984; Bakalowicz, 1979), dont les plus importantes sont :

- l'hétérogénéité et la discontinuité de la zone noyée : les réserves occupent, lorsqu'elles existent, des réservoirs discontinus et hétérogènes (appelés systèmes annexes), constitués d'ensembles indépendants les uns des autres, mais qui sont tous en relation avec le drain ;
- la dissociation systématique des fonctions capacitives (zone de stockage constituées par les systèmes annexes au drainage ou « SAD ») et transmissives (relation au sein du karst noyé par le drain) ;

- l'existence de forts contrastes de vitesse d'écoulement.

I.4.3. Systèmes karstiques non fonctionnels

Ils renferment des vides organisés, mais ceux-ci ne conditionnent pas les écoulements souterrains en raison des conditions hydrauliques extérieures (conditions aux limites), suite par exemple à la remontée du niveau de base. Il en résulte un comportement assimilable à celui des milieux poreux à l'échelle globale, le terme linéaire des pertes de charge dans les écoulements étant prépondérant. A l'échelle locale, des comportements karstiques peuvent réapparaître à la faveur de contrastes hydrauliques atteints sous influence d'un pompage.

I.5. Relation plissement fractures

Cette partie est très intéressante pour connaître la répartition des fissures dans un système plissé. En effet, la nature et la direction des contraintes qui agissent sur une couche pour former un plissement, jouent un rôle important pour connaître la direction et la taille des fissures. Ci-dessous, nous présentons les différents types de plissement ainsi que les fissures qui l'accompagnent :

I.5.1. Les modes d'initiation du plissement (in Bazalgette, 2004)

Il existe trois modes de sollicitation majeurs pouvant conduire au plissement des roches (figure 4) :

- Le fléchissement (ou bending), où les forces responsables de l'apparition de la courbure agissent selon une direction sub-orthogonale aux couches sollicitées. Les plis initiés grâce à ce mécanisme sont généralement regroupés sous le terme de « plis forcés » ou « plis passifs ».
- Le flambage (ou buckling), où les forces responsables de l'apparition de la courbure agissent selon une direction sub-parallèle aux couches sollicitées.
- Enfin, l'amplification passive, qui conduit à la distorsion de plis préexistants due à un fluage général de la roche.

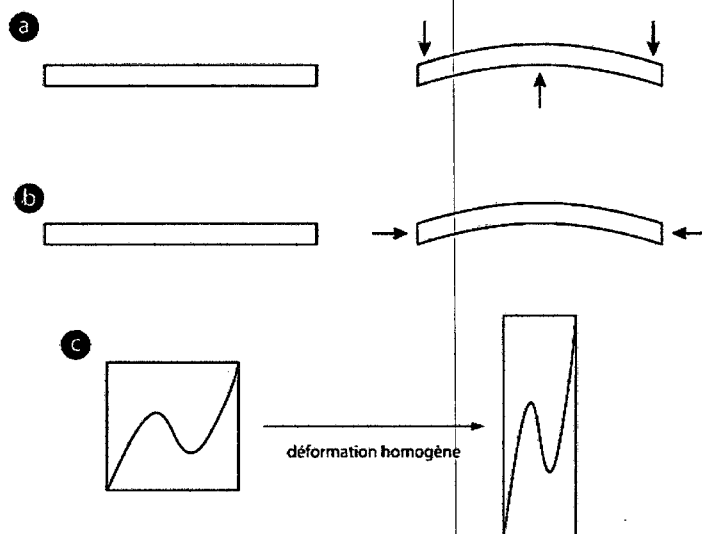


Figure 4 : Les trois principaux mécanismes de plissement dans les roches (d'après Suppe, 1985) : a) le fléchissement (ou bending), b) le flambage (ou buckling), c) l'amplification passive.

I.5.2. Relations directionnelles plissement/fracturation (in Bazalgette ,2004)

Classiquement, les relations géométriques entre les plis et les réseaux de fractures rencontrés sur les exemples de terrain sont décrites par la caractérisation de l'angle existant entre l'azimut de ces fractures et celui de l'axe des plis. La figure 5 montre une image simplifiée de ces relations.

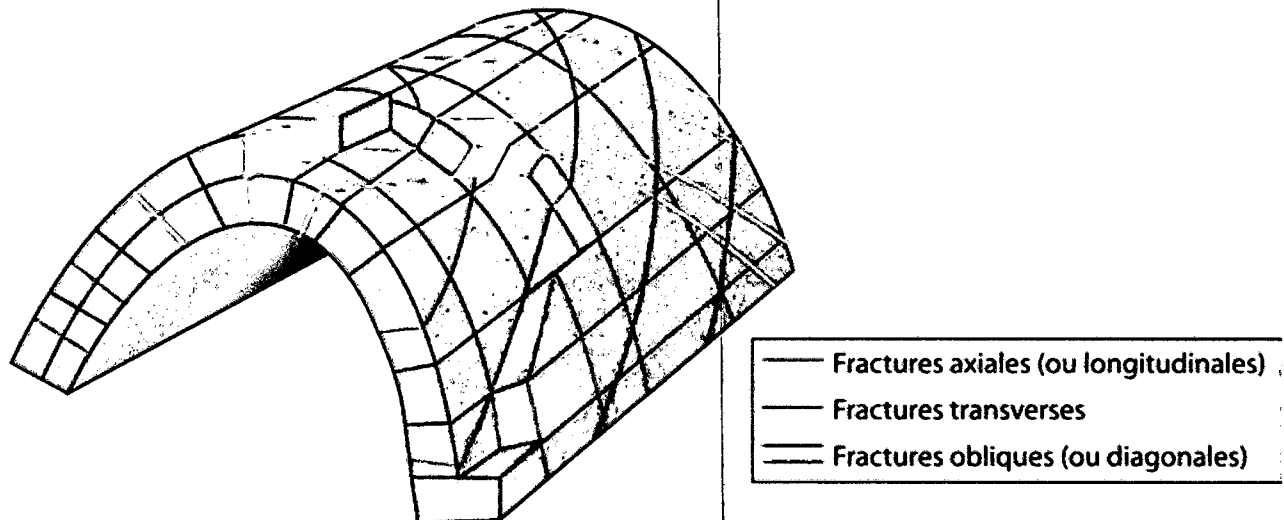


Figure 5 : Illustration schématique de la terminologie utilisée classiquement pour décrire les relations directionnelles entre fractures et plis (modifié d'après Ramsay & Huber, 1987). Les fractures axiales (ou longitudinales) sont parallèles à l'axe du pli, les fractures transverses sont orthogonales à cet axe et les fractures obliques (ou diagonales) font un angle fort avec cet axe (in Bazalgette, 2004).

Bazalgette (2004) a fait une synthèse bibliographique sur les règles de tendance des fractures dans les plissements et a permis d'extraire certaines règles concernant le développement et la distribution des fractures au sein des unités plissées. Ces règles et tendances sont les suivantes :

- La fracturation dominante se résume aux deux familles directionnelles orthogonales axiales et transverses. Les deux familles sont généralement présentes dans le cas de plis en flambage. Les plis en fléchissement passif (plis forcés) ne sont souvent affectés que par la direction axiale.
- En fonction des exemples, ces fractures axiales et transverses peuvent être ou non accompagnées d'une ou deux familles d'obliques (rarement plus). La fracturation associée aux plis se résume très rarement aux obliques.
- Dans les rares cas où la fracturation associée aux plis se résume aux obliques.

Ci-dessous, nous présentons plusieurs figures qui illustrent la relation fracture/plissement dans les synclinaux, anticlinaux et en présence des failles :

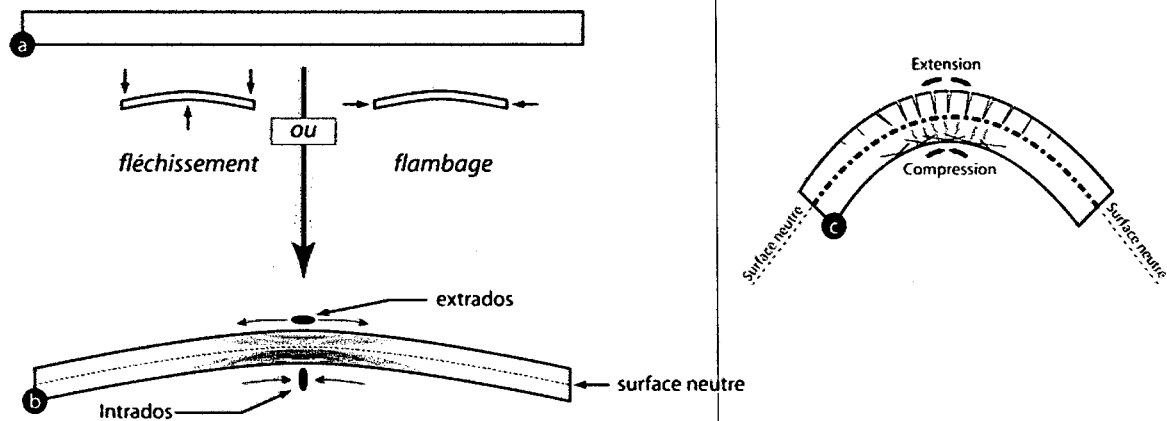


Figure 6 : Le modèle d'intrados / extrados (d'après Ramberg, 1964).

- (a) Stade initial : poutre non déformée.
- (b) Distribution des contraintes locales en compression et en extension dans la charnière formée par la poutre élastique flexurée après sollicitation en fléchissement ou en flambage (d'après Keunen & de Sitter, 1938).
- (c) Distribution de la fracturation (stade de rupture fragile post-élastique) apparue dans une couche courbée. On distingue deux zones : l'intrados, soumis à une compression locale où se développent stylolites et/ou failles inverses et l'extrados, soumis à une extension locale où se développent des fractures en mode I et éventuellement des failles normales. La frontière virtuelle qui sépare ces deux compartiments est appelée surface neutre. Le long de cette surface, la contrainte locale liée à la courbure est nulle. (In Bazalgette (2004))

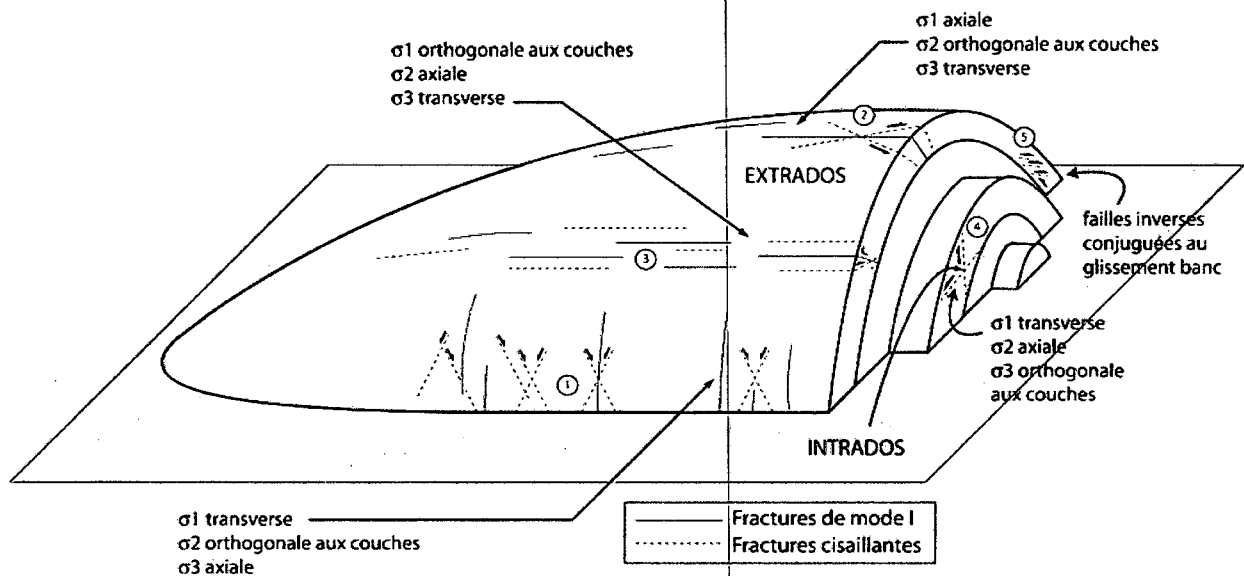


Figure 7 : Modèle classique de distribution des fractures au sein d'un anticlinal idéalisé inspiré du Teton Anticline, Montana, U. S. A. (d'après Stearns, 1964 ; Stearns & Friedman, 1972, in Bazalgette 2004)

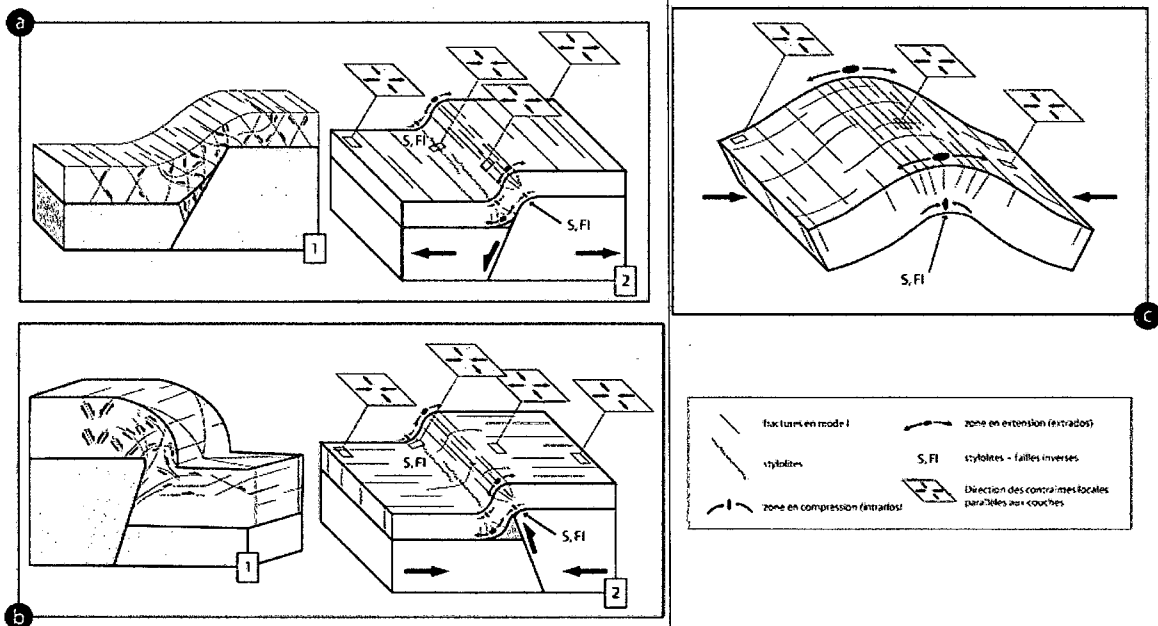


Figure 8 : Distribution des contraintes locales et de la fracturation associées à trois types de plis différents (dans des monocouches).
 (a) Cas d'un pli forcé initié à l'aplomb d'une faille normale : (1) distribution de la fracturation cisailante de grande échelle (failles) d'après Ameen, 1988; (2) distribution de la fracturation de mode I.
 (b) Cas d'un pli forcé initié à l'aplomb d'une faille inverse : (1) distribution de la fracturation cisailante de grande échelle (failles) d'après Ameen, 1988, (2) distribution de la fracturation de mode I.
 (c) Distribution de la fracturation de mode I dans le cas d'un pli de flambage, (in Bazalgette, 2004)

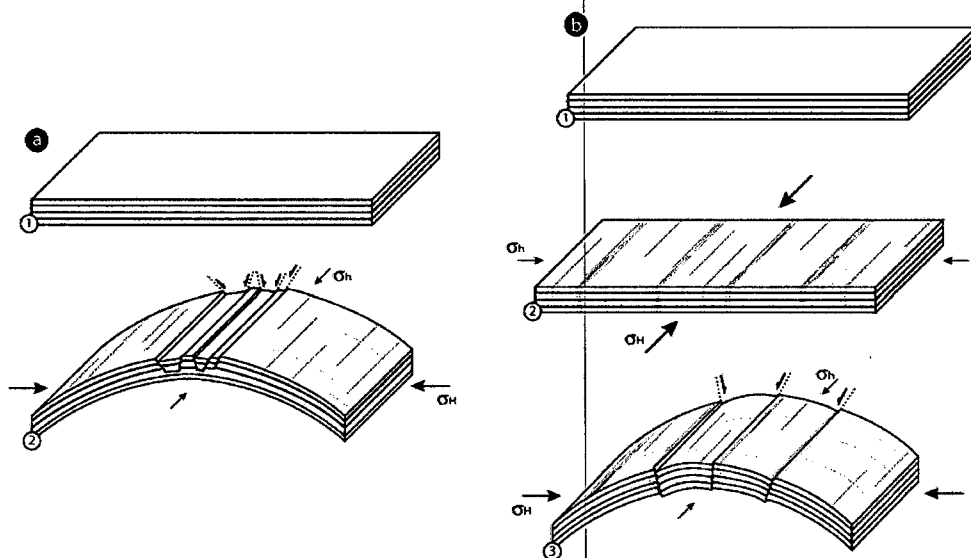


Figure 9 : Origines mécaniques possibles des failles normales axiales.
 (a) Origine syn-plissement où les failles « andersoniennes » sont issues de la néo-rupture des roches en zone d'extrados.
 (b) Origine précoce où les failles sont issues de la réactivation de fractures ou de corridors fracturés (c'est le cas ici) hérités d'un stade de déformation antérieur, (in Bazalgette, 2004)

I.6. Démarche des études des aquifères karstiques

La démarche méthodologique des études des aquifères karstiques comprend 2 phases principales, à savoir la phase d'identification et la phase de caractérisation (in Dörfliger et al. 2010).

I.6.1. Identification

Le système est analysé dans sa globalité, pour déterminer l'extension du bassin d'alimentation de la source ou du groupe de sources ou plus généralement du captage (forage, source captée). Pour ce faire, il est nécessaire dans un premier temps de définir à partir de la géologie structurale et de la lithostratigraphie, la structure de l'aquifère, sa géométrie, le type de système (unaire ou binaire) et de localiser les manifestations endo et exokarstiques : réseaux de cavités, position des exutoires (sources pérennes et temporaires), les pertes, avens, dolines.

A l'issue de cette identification, un plan d'étude peut être établi afin de délimiter le bassin d'alimentation, avec notamment la définition du bilan hydrologique, l'utilisation des essais de traçage artificiels (traçages de reconnaissance) qui permet de valider et caractériser les connexions hydrauliques pour différentes conditions hydrologiques (à noter que l'impluvium d'un système karstique peut varier en fonction des conditions hydrologiques) et l'étude des informations géologiques caractérisant l'organisation des écoulements (pouvant être liée à l'évolution paléogéographique).

L'analyse des débits classés est utilisée afin de déterminer des modifications de propriétés des écoulements pour la gamme de débits couverte lors d'un cycle hydrologique.

I.6.2. Caractérisation

La caractérisation des aquifères karstiques peut être effectuée à partir d'informations issues soit des sources, soit des forages ou des piézomètres, soit des regards naturels du système (gouffre, aven, grotte, rivière souterraine).

L'étude des débits (débits classés) conjointement à l'analyse simplifiée ou à l'étude des courbes de récession permettent d'obtenir des informations sur le volume des réserves, sur l'existence de fuites ou d'alimentation du système, sur le degré de karstification et sur l'organisation des écoulements au sein de l'aquifère.

L'interprétation d'essais de pompage sur un forage situé en amont d'un exutoire ou sur un système annexe au drainage permet de définir les conditions d'exploitation et d'obtenir également des renseignements sur la karstification aux alentours de l'ouvrage, sur l'importance de la connexion entre les conduits et son environnement.

Les traçages peuvent également être interprétés de manière quantitative ; le volume du système traçage peut être déterminé et confronté aux résultats des méthodes hydrologiques.

Les études hydrochimiques, en plus de fournir des informations sur la qualité de l'eau, permettent de préciser l'organisation des écoulements au sein des différents compartiments de l'aquifère (aquifère épikarstique, zone d'infiltration, zone noyée), d'identifier l'origine de mélanges d'eaux, d'approcher l'âge de l'eau et l'altitude de la zone de recharge.

I.7. Conclusion

Ce rappel bibliographique nous a permis de montrer le rôle de l'histoire tectonique (plissement, faille...) d'une région dans la connaissance de la répartition spatiale des fissures dans les couches carbonatées. Ces derniers sont considérés comme la base pour la circulation des eaux dans le milieu fissurés. D'autres méthodes, pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des aquifères fissurés, sont citées dans la bibliographie, tel que le traçage, les essais de pompage, la chimie des eaux...

Une partie de ces méthodes (géologique, tectonique, géophysique, hydrodynamique et chimique) sera utilisée dans ce travail de recherche pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

II.1. Situation géographique et conditions climatologiques

II.1.1. Situation géographique

La zone d'étude se situe au Nord-Est algérien, entre les villes de Tébessa et Khenchela. Elle s'éloigne de la ville de Tébessa par une distance de 30 Km vers l'ouest et de la ville de Khenchela par une distance de 33 Km vers l'est. Elle s'étale sur une superficie de 535 Km² et couvre des parties des communes suivantes : Meskiana, Dalaa, Ain Touila, Gourrigueur, Bir Mokadam et Chéria (figure 10).

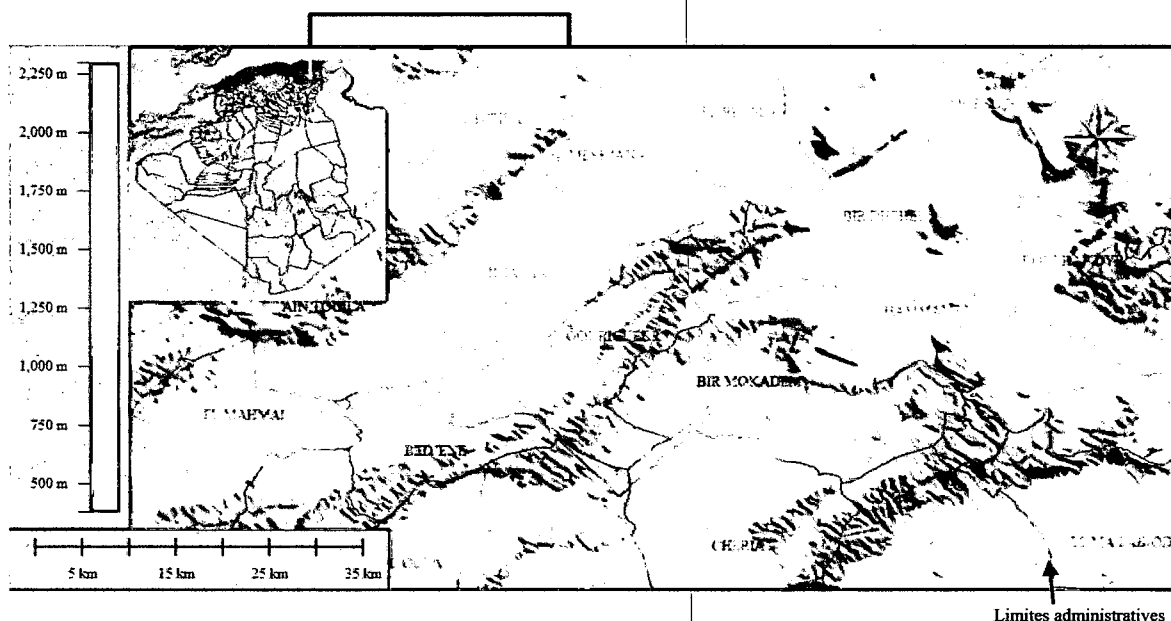


Figure 10 : Situation géographique de la zone d'étude

Du point de vue hydrographique la zone d'étude s'étend sur deux bassins versants (figure 11) :

- Le Bassin versant de Meskiana : Les eaux superficielles de ce bassin versant se jettent dans l'oued Guergoub El-Maleh (oued Meskiana). Ce dernier prend sa naissance de chott El-Meragueb, puis coule selon la direction SW-NE, il rejoint oued Mellegue et se déverse dans la mer méditerranéenne (golf de Tunis, Tunisie). C'est un bassin versant exoréique ;
- Le Bassin versant de Chéria : Ses eaux superficielles sont drainées par l'oued El-Hallaïl qui se coule selon la direction NE-SW et se déverse dans le Chott Kralla (Algérie). C'est un bassin versant endoréique.

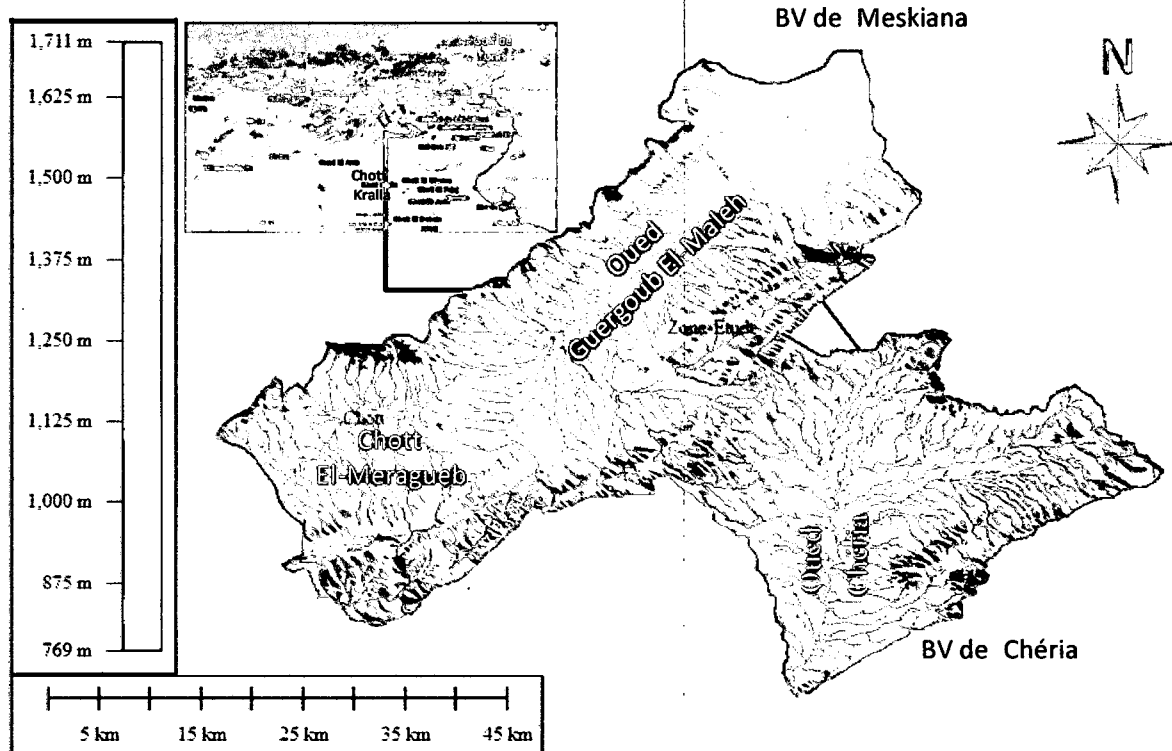
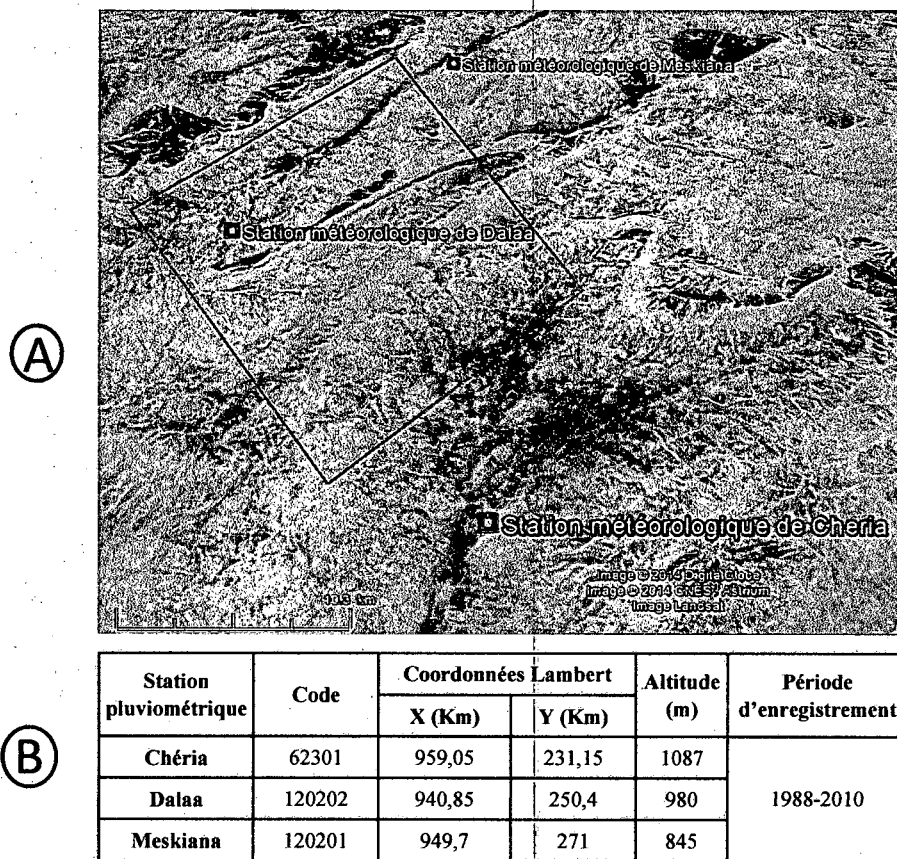


Figure 11 : Situation hydrographique de la zone d'étude

II.1.2. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude

Les paramètres climatiques (précipitation, température et évaporation) sont très importants du point de vue hydrologique et hydrogéologique, ils nous permettront de bien estimer les apports d'eau superficielle (ruissellement) et souterraine (infiltration).

Pour atteindre cet objectif, nous avons basé notre étude sur les données des trois stations pluviométriques (Chéria, Dalaa et Meskiana) qui sont localisées dans ou au voisinage de la zone d'étude (figure 12). Les données de ces trois stations s'étalent sur une période de 23 ans (1988 – 2010). Pour les données de l'année du suivi hydrodynamique et hydrochimique (avril 2013- février 2014), nous n'avons pas pu obtenir les données climatiques.



Légende : A) Situation géographique des stations pluviométrique de Meskiana, Dalaa et Chéria
 B) Coordonnées des trois stations

Figure 12 : Situation géographique des trois stations pluviométriques par rapport à la zone d'étude

II.1.2.1. Précipitations

L'analyse de l'évolution interannuelle des précipitations, sur une période de 23 ans (1988 – 2010) (figure 13), montre une différence entre les trois stations avec un changement dans le temps de l'importance des précipitations :

- Période de 1988 au 2000 : elle est caractérisée par une précipitation importante dans la station de Chéria, puis Meskiana et enfin Dalaa, avec des valeurs proches entre la station de Dalaa et de Meskiana ;
- Période de 2000 au 2006 : on observe un changement, la station de Dalaa présente les précipitations les plus importantes, puis Meskiana et enfin Chéria, avec des valeurs proches entre Chéria et Meskiana ;
- Période de 2006 au 2010 : on observe un autre changement, la station de Meskiana devienne la plus importante, puis Chéria et Dalaa avec des valeurs proches entre Chéria et Meskiana.

Cette observation montre que le rapport des précipitations entre les trois stations n'est pas stable et change dans le temps.

- la station de Meskiana, l'année la plus arrosée est celle de 2003 avec une précipitation de 434 mm et l'année la plus sèche est celle de 1996 avec une précipitation de 88,6 mm/an.

- la station de Chéria, l'année la plus arrosée est celle de 1995 avec une précipitation de 458.9 mm et l'année la plus sèche est celle de 2000 avec une précipitation de 128.5 mm/an.
- la station de Ain Dalaa, l'année la plus arrosée est celle de 2005 avec une précipitation de 432.2 mm et l'année la plus sèche est celle de 1994 avec une précipitation de 99.8 mm/an.

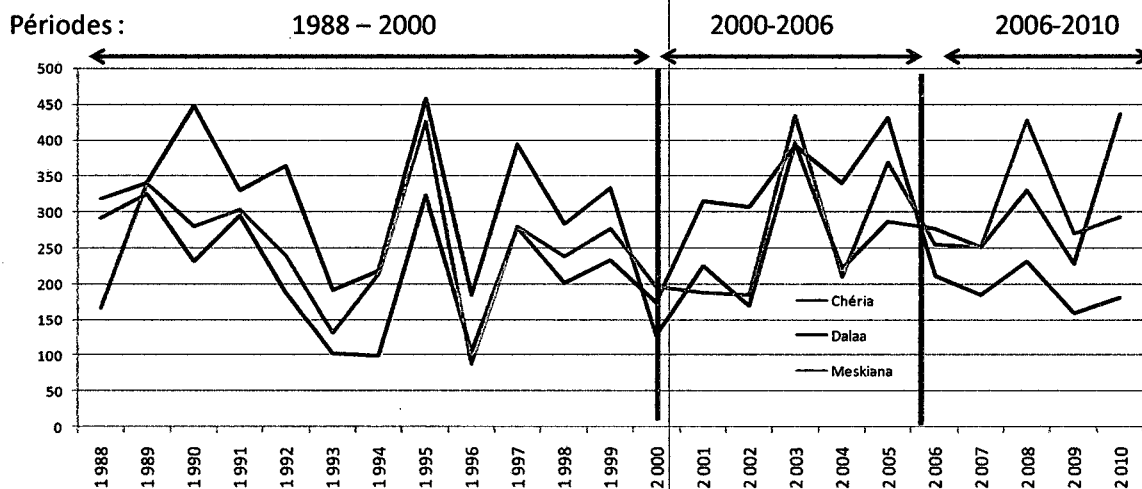


Figure 13 : Evolution interannuelle des précipitations dans les trois stations (1988-2010)

L'évolution cumulée des précipitations montre que c'est la station de Chéria qui a eu plus d'eau sur ces 23 ans, période 1988 – 2010, puis la station de Meskiana et enfin la station de Dalaa (figure 14). Les deux stations ayant les données les plus proches sont celles de Meskiana et Dalaa, cela revient au fait que les deux stations sont spatialement les plus proches et se situent dans le même bassin versant.

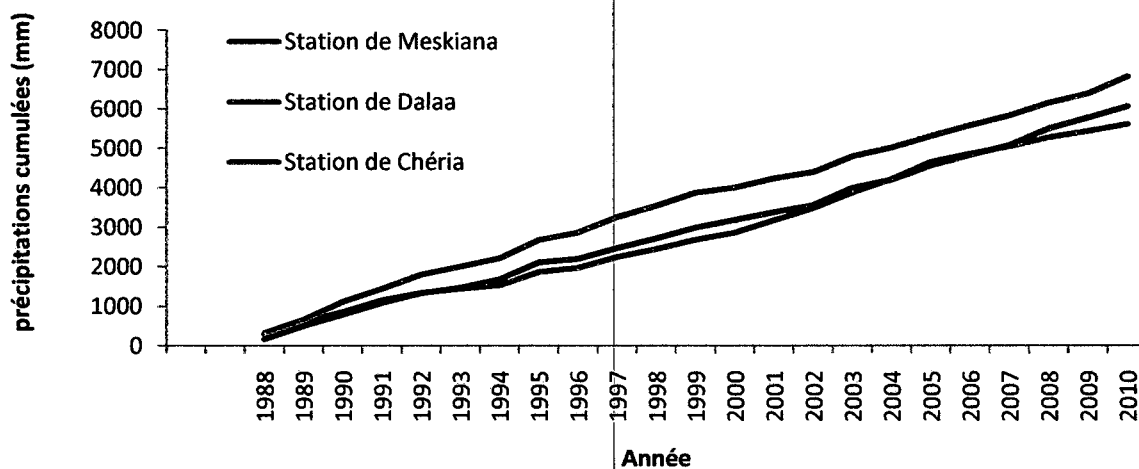


Figure 14 : Cumul des précipitations annuelles pour les trois stations

L'évolution des précipitations moyennes mensuelles des trois stations (figure 15) montre que les trois stations présentent la même évolution avec des précipitations élevées au mois de mai (entre 42,8 et 34,5 mm) et faible au mois de Juillet (entre 3,1 et 12,8 mm).

On constate aussi que la variation intermensuelle présente deux régimes :

- du mois d'octobre à avril : de faibles variations des précipitations entre les mois ;
- du mois de mai à septembre : de fortes variations des précipitations entre les mois.

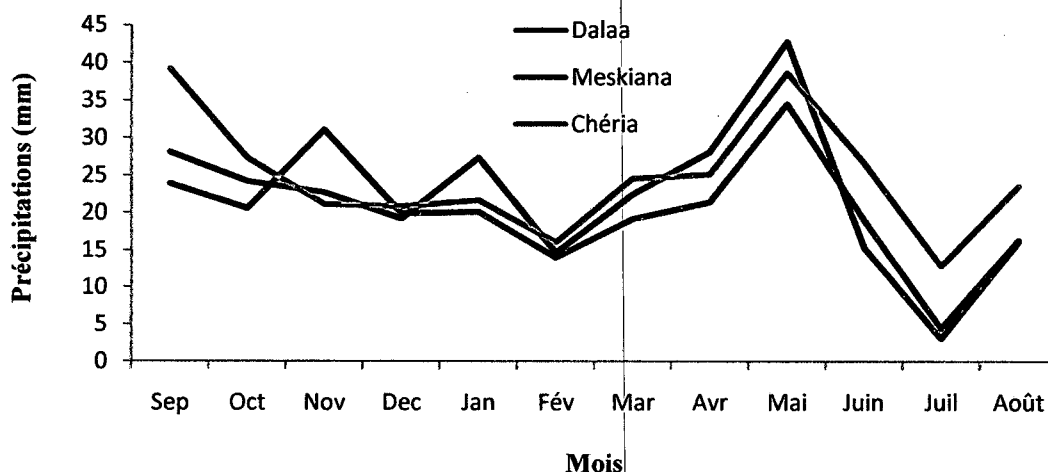


Figure 15 : Evolution de la précipitation moyenne mensuelle (1988 – 2010)

II.1.2.2. Températures

Dans notre zone d'étude, il n'y a pas de station pour la mesure de la température, pour cela, nous avons utilisé celle de Tébessa (situé à 30 Km de la zone d'étude) avec des corrections en fonction de l'altitude.

Pour corriger les températures, nous avons utilisé le modèle du BNEDER (Bureau National d'Etude pour le Développement Rural) in Djebari (2011). Ce modèle se base sur une série d'applications et de recherche expérimentales des différents types de climat sur le territoire algérien et qui a permis au service de BNEDER d'adopter une formule empirique permettant l'estimation de la température en fonction de l'altitude :

$$T = T_m - 0,73 \times [(h - h_m) / 100]$$

Où : T est la température à estimer à une altitude h ;

T_m : est la Température de la station référentielle à une altitude h_m

L'estimation de la température dans les trois stations (Chéria, Dalaa et Meskiana) à partir de la station de Tébessa est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 1) :

Mois Station	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	Moy
Tébessa	22,8	18,13	12,78	8,4	6,5	7,98	11,11	12,74	18,39	22,74	26,14	25,89	16,13
Chéria	21,36	16,7	11,34	6,96	5	6,54	9,67	11,3	16,95	21,3	24,7	24,45	14,68
Dalaa	22,14	17,47	12,12	7,74	5,84	7,32	10,45	12,1	17,73	22,1	25,48	25,23	15,47
Meskiana	23,13	18,46	13,1	8,73	6,83	8,31	11,44	13,07	18,72	23,07	26,46	26,22	16,46

Tableau 1 : Estimations des températures moyennes mensuelles par le modèle de BNEDER

La représentation graphique des températures est présentée dans la figure ci-dessous :

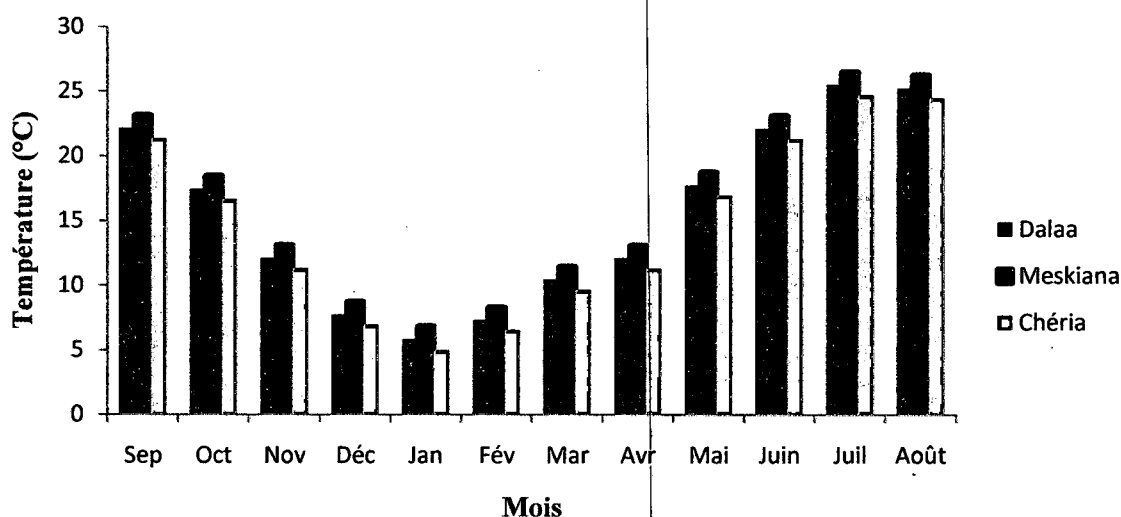


Figure 16 : Variation de la température moyenne mensuelle (1988 – 2010)

Cette figure montre que le mois le plus chaud est le mois de Juillet (24,7°C à Chéria, 25,48 à Dalaa et 26,46 à Meskiana) et le mois le plus froid est le mois de Janvier (5°C à Chéria, 5,84 à Dalaa et 6,83 à Meskiana). Indiquant que l'effet d'évaporation sera maximum dans le mois de juillet et minimum dans le mois de janvier.

II.1.2.3. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration est un élément très important pour l'établissement du bilan hydrologique. Elle est définie comme étant l'ensemble des pertes par transformation de l'eau en vapeur à partir d'une surface quelque soit sa nature : sol, végétation, surface d'eau libre.

L'évapotranspiration potentielle est la consommation d'eau sous l'action conjuguée de l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration de la plante. Pour le calcul de l'ETP, nous avons utilisé la formule de Thornthwaite :

$$ETP = 16 (10 T/I)^a \cdot K$$

Où: $a = 0.016 (I) + 0.5$

$$I = \sum i$$

$$i = (T/5)^{1.514}$$

T : température moyenne mensuelle en °C

i : Indice thermique mensuel

I : Indice thermique annuel

K : Facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jour du mois.

Les résultats obtenus de l'ETP pour les trois stations sont récapitulés dans les tableaux 2, 3 et 4.

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T (°C)	22,14	17,47	12,12	7,74	5,84	7,32	10,45	12,1	17,73	22,1	25,48	25,23
ETP	102,29	69,36	38,08	18,25	11,49	16,65	29,86	37,97	71,06	102	128,8	126,73
K	1,03	0,97	0,85	0,83	0,86	0,84	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16
ETP c	105,36	67,28	32,36	15,14	9,89	13,99	30,75	41,77	85,98	124,4	159,7	147

Tableau 2 : Résultat du calcul de l'ETP (station de Dalaa)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T (°C)	23,13	18,46	13,1	8,73	6,83	8,31	11,44	13,07	18,72	23,07	26,46	26,22
ETP ne	106,58	71,98	39,63	19,56	12,76	17,95	31,31	39,47	73,76	106,1	134,68	132,56
K	1,03	0,97	0,85	0,83	0,86	0,84	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16
ETP c	109,77	69,82	33,68	16,23	10,97	15,08	32,25	43,42	89,25	129,4	167	153,77

Tableau 3 : Résultat du calcul de l'ETP (station de Meskiana)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T (°C)	21,36	16,7	11,34	6,96	5	6,54	9,67	11,3	16,95	21,3	24,7	24,45
ETP ne	98,73	67,26	36,77	17,17	10,25	15,58	28,68	36,57	68,83	98,3	123,86	121,9
K	1,03	0,97	0,85	0,83	0,86	0,84	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16
ETP c	101,7	65,24	31,25	14,25	8,81	13,08	29,54	40,22	83,29	119,9	153,58	141,41

Tableau 4 : Résultat du calcul de l'ETP (station de Chéria)

II.1.2.4. Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique nous permet d'évaluer la répartition des précipitations (P) entre l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement (R), l'infiltration (I) et la réserve facilement utilisable (RFU). Il est donné par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I + \Delta RFU$$

Pour calculer ce bilan, nous avons opté pour la méthode de Thornthwaite, parce qu'elle donne les valeurs de l'évolution mensuelle de ces paramètres du bilan.

Le principe de calcul du bilan hydrologique de Thornthwaite est le suivant :

- si pour un mois $P \geq ETP$ on pose que l'ETP = ETR, la quantité d'eau qui reste ($P - ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (26 mm, paragraphe ci-dessous) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès (WS) qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.
- si $P < ETP$, la valeur de $ETR = P + RFU$, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

a) Calcul de la RFU

L'établissement de ce bilan débute par le calcul de la RFU. Cette dernière est la quantité d'eau emmagasinée dans la couche pédologique. Elle est donnée par la formule suivante :

$$RFU = 1/3 Da. He. P \text{ (Hallaire 1960, in Ziani, 2009).}$$

Avec:

- RFU : Réserve Facilement Utilisable ;
- Da : densité apparent du sol, pour notre zone d'étude $Da = 1,4$ (in Gouaidia 2008) ;
- He : humidité équivalente, estimé à 25% (In Gouaidia 2008) ;
- P : profondeur de la couche traversée par les racines 22 cm (in Gouaidia 2008).

$$RFU = 26 \text{ mm}$$

b) Calcul du bilan hydrologique

Le calcul du bilan hydrologique, nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans les figures ci-dessous (Figure 17, 18 et 19) :

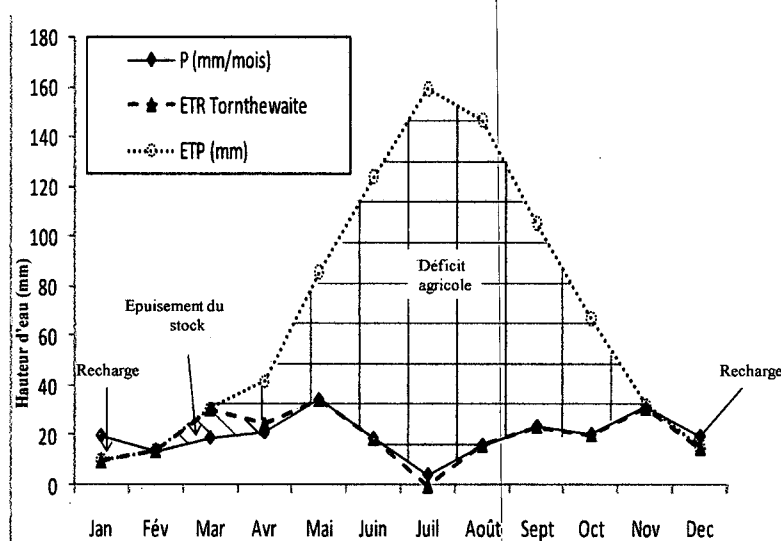


Figure 17 : Bilan hydrologique à la station de Dalaa (méthode de Thornthwaite)

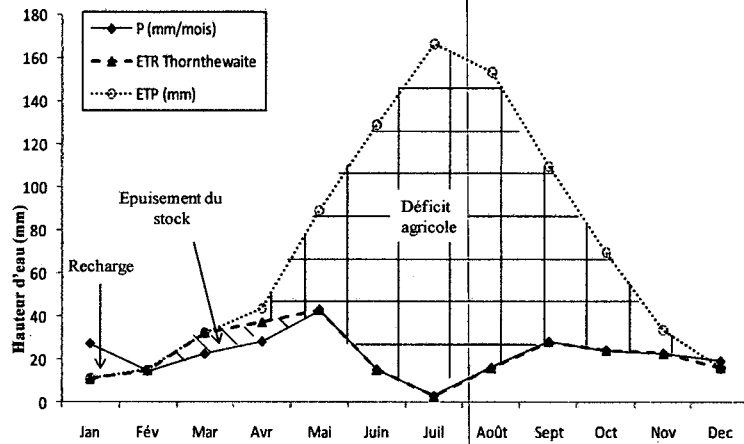


Figure 18 : Bilan hydrologique à la station de Meskiana (méthode de Thornthwaite)

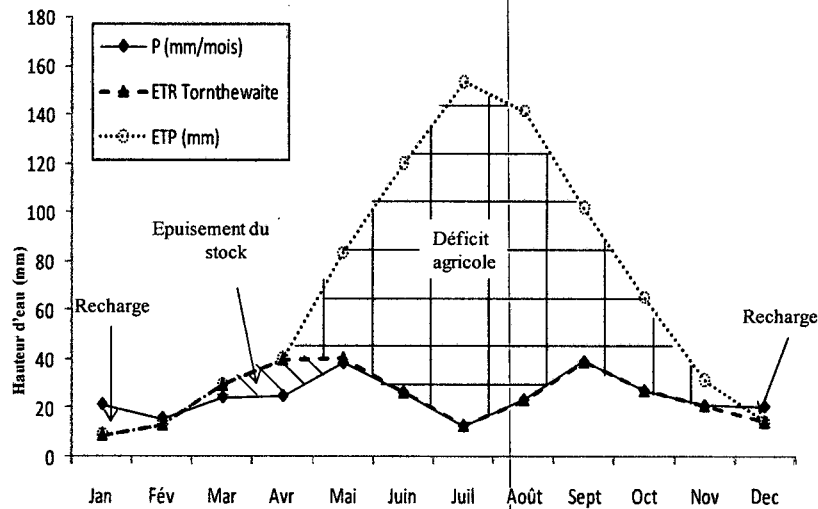


Figure 19 : Bilan hydrologique à la station de Chéria (méthode de Thornthwaite)

Ces graphes montrent que :

- La période qui s'étale du mois de décembre au mois de février présente des valeurs de précipitation supérieures ou égales à l'ETP. Pendant cette période, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU.
- A partir du mois d'avril pour les stations de Dalaa et Meskiana, et le mois de Mai pour la station de Chéria et jusqu'au mois de novembre, on assiste à un épuisement de la RFU ce qui traduit par un déficit agricole qui atteint son maximum au mois de Juillet (155,3 mm, 163,9 mm et 140,78 mm respectivement dans les stations de Dalaa, Meskiana et Chéria).

c) Décomposition de l'excès d'eau (WS)

Selon notre recherche bibliographique, nous n'avons pas trouvé une formule pour décomposer mensuellement l'excès en eau, pour cela nous l'avons décomposé selon les données annuelles moyennes.

Ruissellement :

Ce paramètre est estimé à partir de la formule de TIXERONT – BERKALOFF :

$$R = P^3/3 ETP^2$$

Où : P : précipitation moyenne annuelle en mm

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm

Infiltration :

C'est la lame d'eau infiltrée dans le sol et qui alimente les eaux souterraines. Elle est présentée par la formule suivante :

$$I = P - ETR - R$$

L'application numérique de ces estimations du ruissellement et d'infiltration est présentée dans le tableau suivant :

Station	Précipitation (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Ruissellement (mm)	Infiltration (mm)
Chéria	297,1	802,27	297,1	13,58	0
Dalaa	244,4	833,64	244,4	7	0
Meskiana	263,9	870,68	263,6	8,08	0

Tableau 5 : Ruissellement et l'infiltration dans les stations de Chéria, Dalaa et Meskiana

Les résultats du calcul montrent que l'infiltration directe à partir du sol est nulle dans la zone d'étude. Cela implique que l'alimentation des eaux souterraines de notre zone d'étude provienne de l'infiltration directe dans les calcaires fissurés qui affleurent dans les sommets.

II.1.3. Conclusion

Cette étude montre que la zone d'étude est située sur deux bassins versants différents avec des conditions climatologiques et hydrologiques différents. Ce qui implique que chaque partie de la zone d'étude doit être étudiée en fonction de son bassin versant.

Les précipitations enregistrées dans les stations de Chéria, Meskiana et Dalaa montrent que les précipitations mensuelles varient entre 3 et 45 mm et les précipitations annuelles varient entre 100 et 450 mm, impliquent que la zone d'étude est caractérisée par de faibles précipitations.

La détermination des paramètres du bilan hydrologique montre que l'infiltration à partir du sol est nulle, indiquant que l'infiltration principale des aquifère du sous sol se fasse à travers les calcaires fissurés qui affleurent dans les sommets des montagnes.

II.2. Géologie de la zone étude

II.2.1. Introduction

La zone d'étude est répartie entre quatre cartes géologiques de 1/50 000, selon le découpage de l'Algérie du nord (figure 20) : la carte de l'Ain Dalaa, la carte de Hammamet, la carte de Zoui et la carte de Chéria. Seule la carte de l'Ain Dalaa a été éditée et elle couvre seulement la moitié de la zone d'étude. Pour cela nous avons préféré en premier temps de présenter la zone d'étude sur la carte de l'est Algérien (1/500 000) (Deleau et Laffitte, 1951).

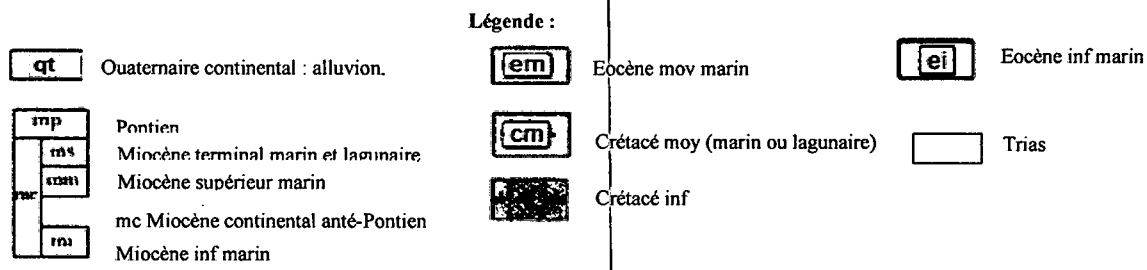
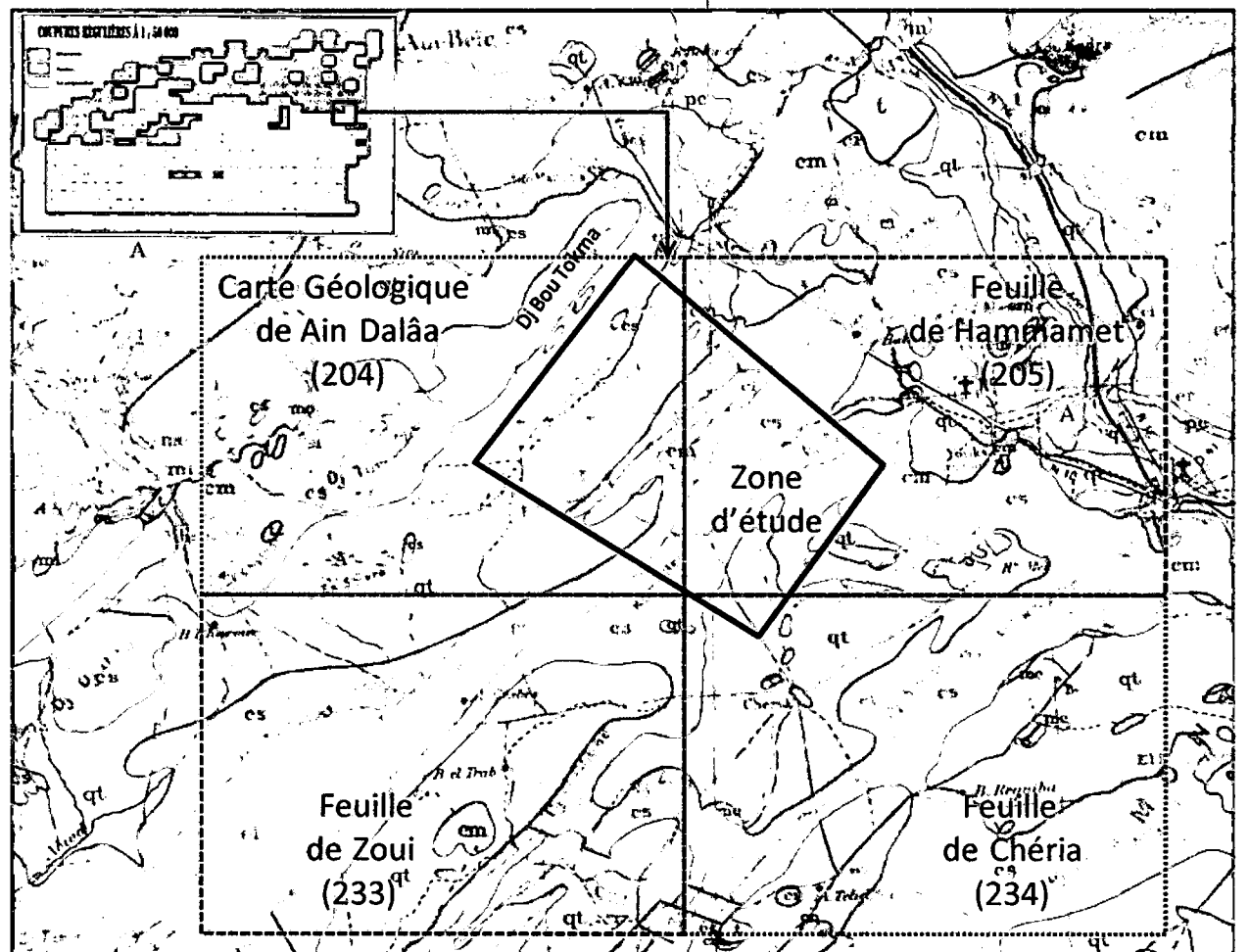
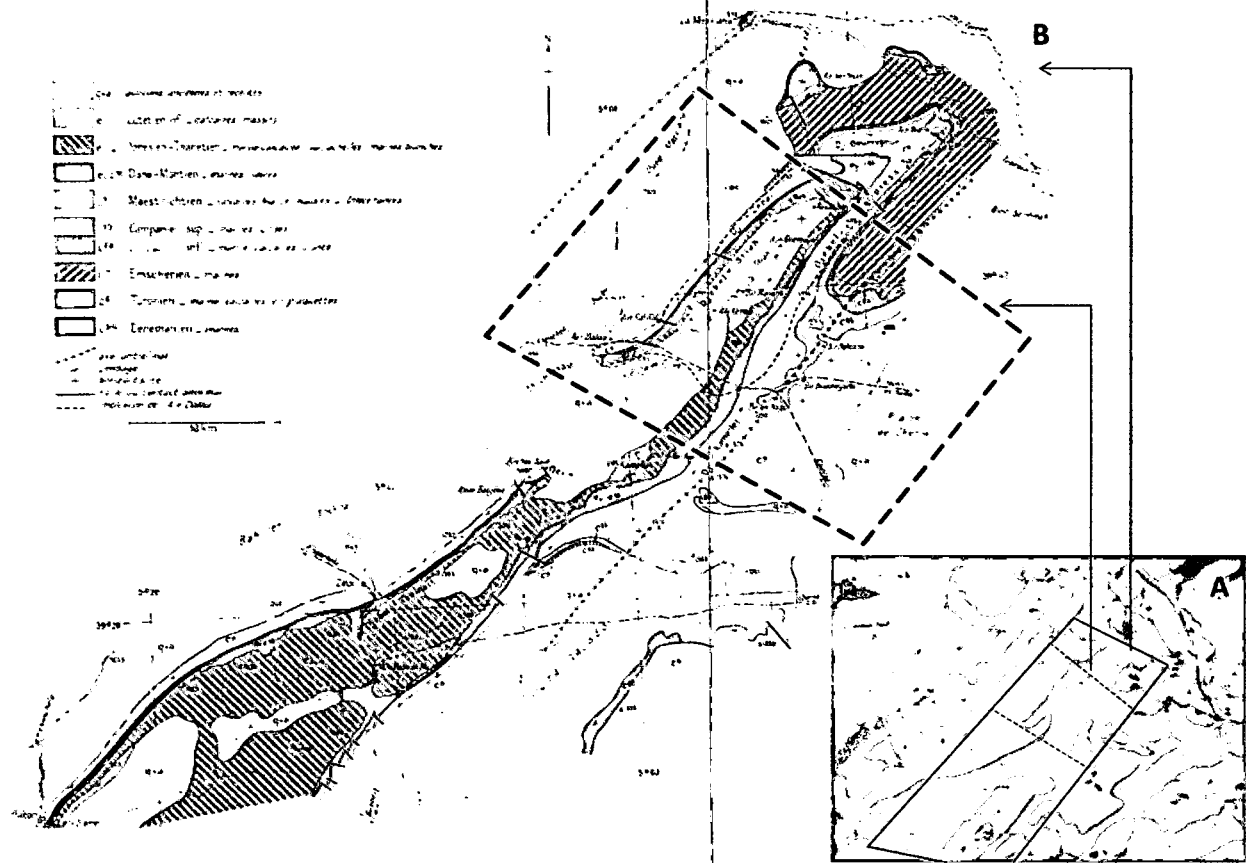


Figure 20 : Position de la zone d'étude et des quatre cartes géologiques (Ain Dalaa, Hammamet, Zoui et Chéria) sur un extrait de la carte géologique de l'est algérien (1/500 000) (Deleau et Laffitte, 1951)

Une autre étude géologique a été réalisée sur le synclinal de Ain Dalaa par Durozoy (1952) (figure 21). Cette étude couvre le centre de la zone d'étude.



Légende : A : Position de la zone d'étude sur un extrait de la carte géologique de l'est Algérien (1/500 000) (Deleau, et Laffitte, (1951)

B : Carte géologique du synclinal d'Ain Dalaa (Durozoy, 1952)

Figure 21 : Position et carte géologique du synclinal d'Ain Dalaa (Durozoy, 1952)

Les deux cartes (Ain Dalaa et synclinal d'Ain Dalaa (Gourrigueur)) couvrent seulement des parties de la zone d'étude. Dans ce chapitre, nous allons acquérir les données nécessaires à partir des différents travaux géologiques (carte, rapport et notice) pour décrire la géologie de la zone d'étude.

II.2.2. Lithostratigraphie

Pour décrire cette partie, nous avons basé notre étude sur la notice et la carte géologique d'Ain Dalaa (Vila, 1977) et les travaux de Durozoy (1952) sur le synclinal d'Ain Dalaa. Nous présentons ci-dessous les formations géologiques, de la zone d'étude, du plus ancien au plus récent :

II.2.2.1. Trias

Argile varicolores et gypses chaotiques à glaçon calcaro-dolomitique et cargneules. Le trias affleure en masse chaotique, sans aucune stratification, dans ces masse divers élément sont reconnaissables (cargneules jaunâtres, dolomies noires, grés, gypses marneux, gypses fibreux) et emballés dans des argilites vertes, livide ou lie-de-vin. (Villa 1977).

II.2.2.2. Crétacé

II.2.2.2.1. Cénomanién : Il affleure dans la partie Nord de la zone d'étude (figure 20), sous forme d'une série très puissante (environ 600 à 1000 m) de marnes argileuses gris verdâtres et jaunâtres à plaquettes de calcite fibreuse. Elle comprend des intercalations de marnes grises et gris claires et des marno-calcaires.

II.2.2.2.2. Turonien : Il est représenté par deux termes :

- Turonien basal : représenté par des marnes grises, des marnes calcaires en plaquettes, des marno-calcaires, des calcaires marneux brunâtres d'une épaisseur pouvant atteindre 270 m.
- Turonien moyen et supérieur: représentés par des marnes beiges à grises, alternant avec des calcaires zoogènes noduleux.

II.2.2.2.3. Coniacien – Santonien

- Le Coniacien est représenté par des alternances de marnes beiges ou grises et des calcaires gris biodétritiques et grumeleux, dont l'épaisseur est de l'ordre de 90 m.
- Le Santonien : des marnes grises et de calcaires marneux à inocérames, avec une épaisseur de 100 m.

II.2.2.2.4. Campanien : Il n'affleure qu'à la périphérie du Djebel Gourrigueur (figure 21).

- Le Campanien inférieur : à la base, des marnes argileuses, ayant une épaisseur de 100 m. Le sommet est représenté par des calcaires crayeux gris et biomicrites, bien stratifiées avec intercalations de marnes, riches en tests d'Inocérames.
- Le Campanien supérieur : alternance des couches de marnes calcaires et de marnes. Ces dernières sont surmontées par une série constituée de marnes argileuses gris verdâtres avec une épaisseur d'environ 130 m.

II.2.2.2.5. Maestrichtien

Le Maestrichtien supérieur est représenté par une formation de 40 m de biomicrosparites grises, noduleuses, pluridécimétriques, phosphatées, et à minces intercalations marneuses, surmontée par 60 m de biomicrites gris-blanchâtre crayeuses en bancs métriques ou plurimétriques à cassure blanche à passées noduleuses et à rognons de silex contiennent des miliolidés, des Inocérames et des fragments d'Huitres et de Rudistes.

II.2.2.3. Paléogène

II.2.2.3.1. Paléocène (Dano-Montien) : Il est représenté par des marnes gris foncées qui sont parfois argileuses, dont l'épaisseur est de l'ordre de 50 m.

II.2.2.3.2. Paléocène – Eocène (Thanétien à Yprésien)

Cette formation débute par 5 m d'alternances de marnes gris-beige et de biomicrites finement gréseuses, beiges, noduleuses, en bancs décimétriques.

Au-dessus viennent, 80 m d'alternances de micrites gris-blanchâtre, décimétriques à nodules phosphatés et de biomicrites intraclastiques en bancs métriques ou décimétriques, blanchâtres souvent noduleuses à grains de phosphates, rognons de silex et à passées lumachelliques à gastéropodes.

Les couches représentent l'intervalle Thanétien-yprésien. Lorsqu'elle est complète, la série atteint 200 m environ.

II.2.2.3.3. Lutétien : Un puissant système lagunaire des calcaires à gypse blanchâtre fragile (in Azizi 2011).

II.2.2.4. Quaternaire

II.2.2.4.1. Villafranchien

L'aspect le plus fréquemment rencontré est celui des croûtes massives et blanches (figure 20). Ces formations perchées par rapport aux surfaces précédentes sont faciles à repérer probablement karstifiées ou dissoutes. Ces faciès représentent habituellement le Villafranchien.

II.2.2.4.2. Glacis polygéniques nappant les reliefs

Ces glacis couvrent une grande surface, leur organisation en pente douce est tout à fait caractéristique. Ils recouvrent le cycle antérieur de glacis, facile à reconnaître car il est constitué de croûtes calcaires massives (figure 20).

II.2.2.4.3. Alluvions actuelles et récentes

Leur extension limitée à la vallée de l'Oued Guergoub el Melah et de ses affluents méridionaux (figure 20). Elles sont constituées par des limons gris assez fins et des graviers.

II.2.3. Tectonique

De point de vue tectonique deux principales phases ont eu lieu pour former de nombreuses structures (figure 22), la première est anté-miocène, la seconde est post-Pontien qu'on peut résumer comme suit :

Durant la première phase, de vastes plissements se sont ébauchés en donnant naissance aux anticlinaux et synclinaux suivants : Le synclinal de dj Tafrent - dj Bou Tokhma, l'anticlinal de la Meskiana (orientés N 50°E) et le synclinal de Ain Dalaa dont l'axe prend la direction SW - NE.

Seules les failles orthogonales aux axes témoignent de mouvements post-Pontien. Celle de Rass Dalaa et de Gourrigueur occasionnent des rejets importants.

L'esquisse tectonique de la zone d'étude est présentée dans la (figure 22):

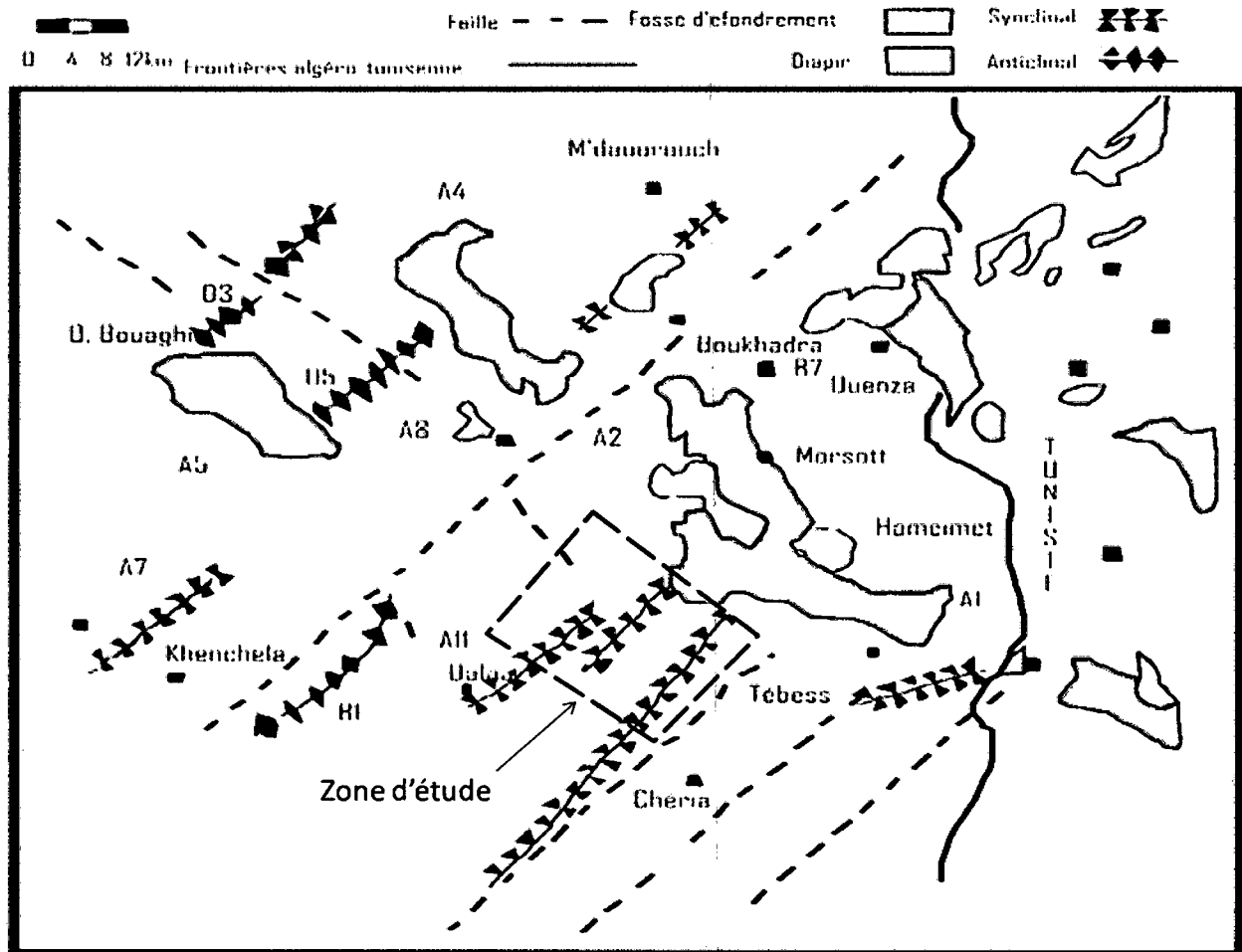


Figure 22: Esquisse tectonique de la région de l'Ain Dalaa d'après G. Durozoy (1952) modifié (in Azizi 2011).

Cette esquisse montre que la zone d'étude est traversée par le synclinal de Gourrigueur (Ain Dalaa) et des anticlinaux et que leur axe s'allonge selon la direction NE-SW. Une image du synclinal de Gourrigueur est présentée ci-dessous :

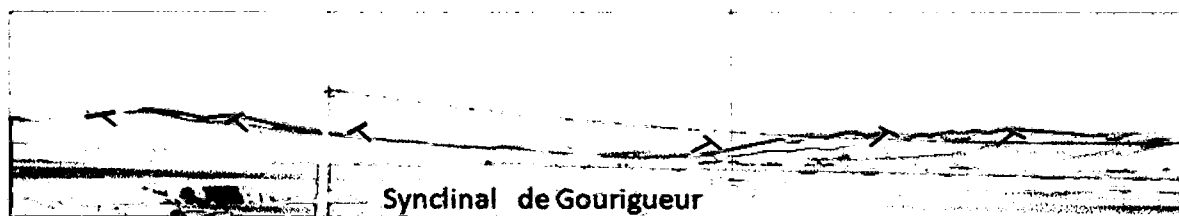


Photo 1 : Synclinal de Gourrigueur

Une fissuration importante a été observée sur le terrain dans les calcaires de l'éocène et du Maestrichtien (photo 2). Elle est liée au plissement et aux failles qui traversent la zone d'étude.

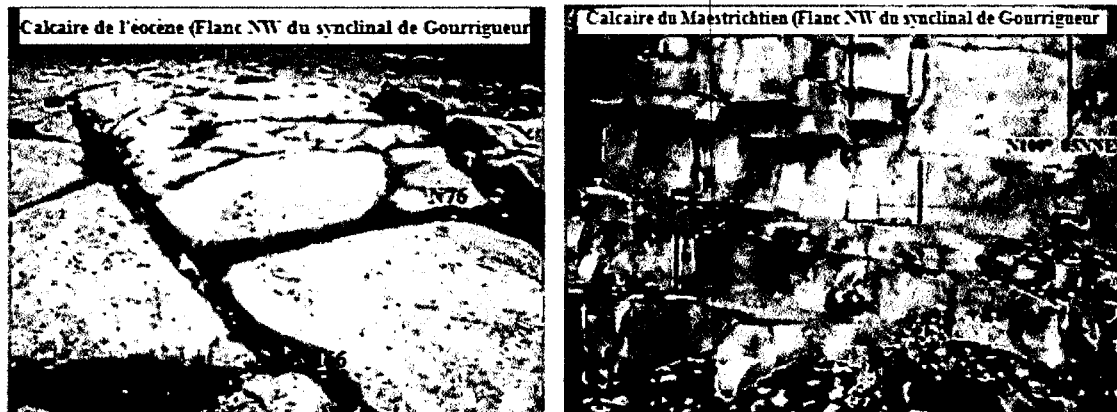
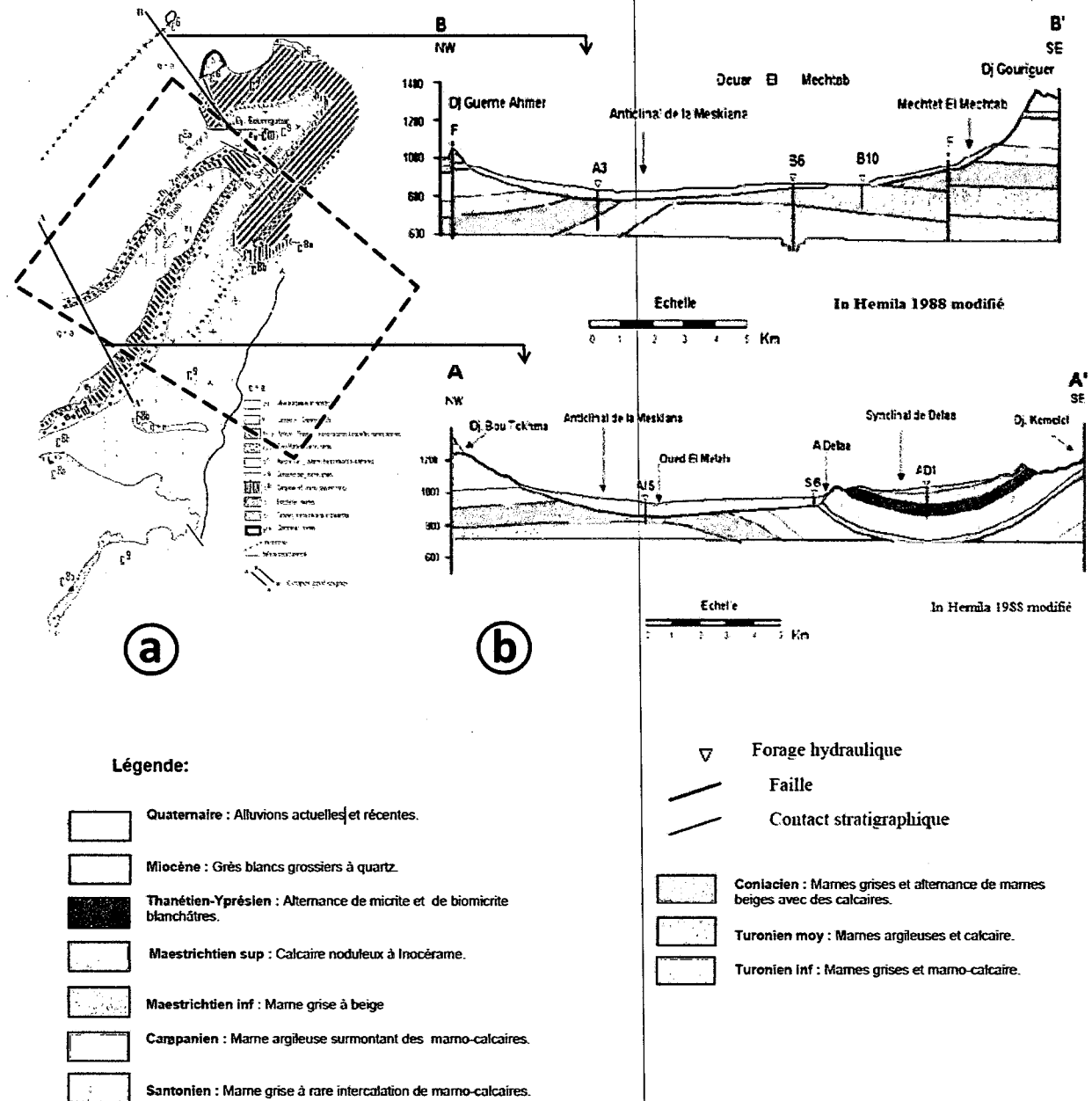


Photo 2 : Fissuration dans les formations géologiques de l'Eocène et du Maestrichtien

Deux coupes géologiques ont été réalisées sur une partie de la zone d'étude selon la direction (NW-SE) sont présentées dans la (figure 23) ci-dessous :



a : Partie amont de la carte géologique du synclinal d'Ain Dalaa (Durozoy, 1952)
 b : Coupes géologiques dans le bassin de Meskiana (in Gouaidia, 2008)

Figure 23 : Coupes géologiques selon la direction NW-SE sur la partie Nord-Ouest de la zone d'étude

En utilisant les logs stratigraphiques des forages existants dans la zone d'étude et cartes géologiques et tectoniques, nous avons tracé une coupe géologique qui traverse l'ensemble de la zone d'étude selon la direction WNW-ESE (figure 24).

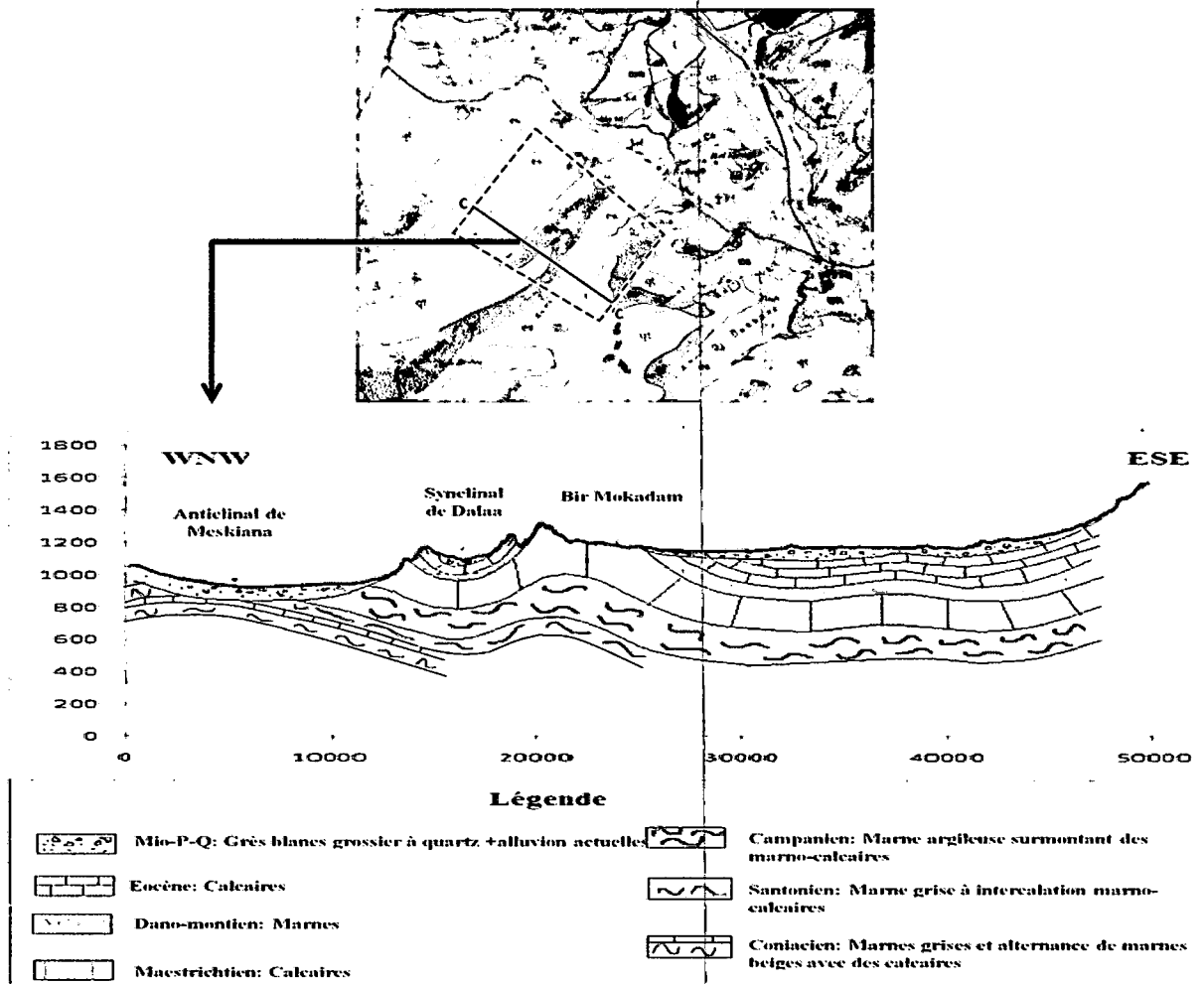


Figure 24 : Coupe géologique selon la direction WNW-ESE

II.2.4. Intérêt hydrogéologique des formations géologiques et de la tectonique de la région

La combinaison entre la nature des formations géologiques et leur caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité) a fait apparaître la possibilité de l'existence de plusieurs aquifères (tableau 6). Les formations calcaires sont considérées perméables vu la tectonique existante (figure 22) et les fissures observées sur le terrain (photo 2).

Période	Epoque	Etage	Epaisseur(m)	Lithologie	Hydrogéologie	
					Perméabilité	Aquifère
Quaternaire	Quaternaire	Quaternaire	?	Limon gris et des graviers; Croûte rosâtre feuilletée; Croûtes calcaires blanches.	Perméable	Aquifère du Mio-Plio-Quaternaire
Néogène	Miocène	Tortonien-Langhien	60	Grès blancs grossiers à quartz		
Paléogène	Eocène	Yéprésien	200	Alternance de micrite déclimitrique gris-blanchâtre et biomirrite décimétrique ou métrique blanchâtre	Perméable	Aquifère de l'Eocène
	Paléocène	Thanétien				
		Montien	70	Marnes gris verdâtres	Imperméable	Substratum
Crétacé	Crétacé sup	Maestrichtien sup	150	Calcaires noduleux ocre avec quelques nodules de silice de couleur blanchâtre	Perméable	Aquifère du Maestrichtien
		Maestrichtien inf	50	Marnes gris-beiges.	Imperméable	Substratum
		Campanien	230	Marnes noires Marnes et micrites	Semi perméable	
		Santonien	100	Marnes grises ou beiges à rares intercalations marno-calcaires.		
		Coniacien	150	Marne grises et alternance de marne beige et calcaire gris.		
		Turonien moy et sup	150	Alternance de marne grise à beige et calcaire zoogène noduleux		
		Turonien inf	200	Marne grise ou noire avec une intercalation marno-calcaire blanchâtre.	Imperméable	
	Cénomaniens sup et moy	800	Marne argileuse à plaquette de calcaire et rare intercalation de marne, de marno-calcaire et de calcaire.			
	Crétacé inf	Albien et Cénomaniens inf	55	Calcaires et marnes argileuses noires.	Semi perméable	
Aptien	10	Marnes grises, biomirrite et dolomie.				
Trias	Trias	Trias	?	Carneule jaunâtre, dolomie noire, grès, gypse marneux et gypse fibreux.		

Tableau 6 : Log hydro-lithostratigraphique des formations géologiques

Du point de vue lithologique, on peut distinguer trois formations géologiques susceptibles d'être aquifère :

a) L'aquifère des calcaires maestrichtiens

Ce niveau couvre d'importantes superficies, formées par des calcaires bien fissurés au moins sur une certaine épaisseur, avec une karstification développée intensément et principalement dans les 50 mètres supérieurs du calcaire (Chaffai et al. 2006).

Dans le synclinal d'Ain Dalaa, ce niveau constitue le principal réservoir et donne naissance à la source de l'Ain Dalaa, celle-ci est située au point le plus bas des affleurements des calcaires maestrichtiens constituant le revers Ouest du synclinal.

b) L'aquifère des calcaires éocènes

Dans le synclinal d'Ain Dalaa, les calcaires éocènes ont une importance hydrologique non discutable (Durozoy, 1952), il constitue l'aquifère principal de la partie Nord du plateau de Chéria où il a été reconnu par de nombreux forages et fait l'objet d'une importante exploitation pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. La perméabilité est celle d'un karst bien développé dans la périphérie de Chéria (Chaffai et al., 2006)

Les caractéristiques des forages qui ont traversé ou touché les calcaires éocènes, ont permis d'établir les remarques suivantes :

- Les zones fissurées se rencontrent en général dans les 100 premiers mètres de l'Eocène et les zones karstifiées sont encore plus localisées dans les 50 premiers mètres.

- Le carottage électrique log normal a donné des résistivités de l'ordre de 200 ohm.m pour les calcaires fissurés et 400 à 600 ohm.m pour les calcaires non fissurés.

c) L'aquifère Mio-plio-Quaternaire

Ce système rassemble deux aquifères :

- L'aquifère du niveau sableux du Miocène : le petit nombre de forage exécutés dans cet aquifère rend les informations moins importantes. Le niveau compris entre 35 et 80 m est attribué aux graviers et sables quartzeux du Miocène.
- L'aquifère des alluvions quaternaires et actuelles : d'après la définition de Lambert (1947), on pourrait les classer en cailloutis fluviaux de colmatage de bas fonds et alluvions de piémont (in Baali, 2007)

Ces formations jouent dans la partie Nord du plateau de Chéria le rôle d'alimentation des calcaires maestrichtiens et éocènes par infiltration.

Il faut signaler que la zone de Dalaa est en réalité une dépression alluvionnaire où l'épaisseur des alluvions peut atteindre 155 m.

Cet aquifère est devenu actuellement sans intérêt, vu la sécheresse qui a sévi pendant les deux dernières décennies, ainsi que la surexploitation des ressources hydriques.

Du point de vue tectonique, ces trois aquifères présentent une grande potentialité en eaux dans les synclinaux (Dalaa et Chéria), vu la géométrie favorable à l'accumulation des eaux souterraines.

II.2.5. Conclusion

Cette étude géologique nous a permis de montrer que la zone d'étude est caractérisée par des formations sédimentaires, essentiellement des calcaires et des marnes ; une succession des plissements (synclinaux et anticlinaux) selon la direction NE-SW ; ainsi qu'un réseau de failles selon la direction WNW-ESE.

Ce type de lithologie et de tectonique est très intéressant de point de vue hydrogéologique, il permet d'avoir des conditions très favorables à la constitution des aquifères. Trois formations géologiques du Maestrichtien, Eocène et de Mio-Plio-Quaternaire présentent une grande potentialité pour former des bons aquifères.

II.3. Etude géophysique

II.3.1. Introduction

Cette étude a pour objectif de bien connaître la nature et l'épaisseur des formations géologiques du sous sol des plaines, qui sont couvertes par les formations quaternaires. Pour cela, nous avons utilisé les données et les résultats de deux campagnes géophysiques :

- Campagne 1 : réalisée en 2007 par le Bureau d'Etude et de Réalisations en Génie Civil et Hydraulique (BEREGH) (Kouba, Alger), pour le compte de l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), en vue d'examiner les différentes possibilités d'existence d'aquifères dans la région ;
- Campagne 2 : réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique (CGG) en 1970 sur le plateau de Chéria à la demande du Service des études Scientifiques, Secrétariat d'état à l'Hydraulique, Dpt. d'Annaba.

Ces deux études sont basées sur la méthode électrique qui détermine la nature des formations géologiques à partir des mesures de leur résistivité.

II.3.2. Etude géophysique de la région de Gourrigueur (ex. Dalaa)

II.3.2.1. Introduction

L'étude géophysique réalisée dans la zone de Gourrigueur au Sud- Est de la source de Dalaa avait des objectifs principaux qui concernent :

- La détermination du toit des calcaires éocènes et maestrichtiens,
- La délimitation du flanc Est du synclinal de Dalaa,
- La localisation des zones à potentialités aquifères,
- Et enfin, la proposition des points d'implantation des forages pour l'exploitation des niveaux aquifères de la région.

La méthode utilisée durant cette étude était celle des sondages électriques verticaux avec les dispositifs Schlumberger.

II.3.2.2. Répartition des sondages électriques

Les sondages électriques ont été disposés suivant des profils Nord-Ouest – Sud-Est, distants de 1 km environ. Quarante-deux (42) sondages électriques ont traversé la zone d'étude répartis sur 5 profils avec des lignes d'injections où $AB = 300, 600, 1000$ et 2000 m (figure 25)

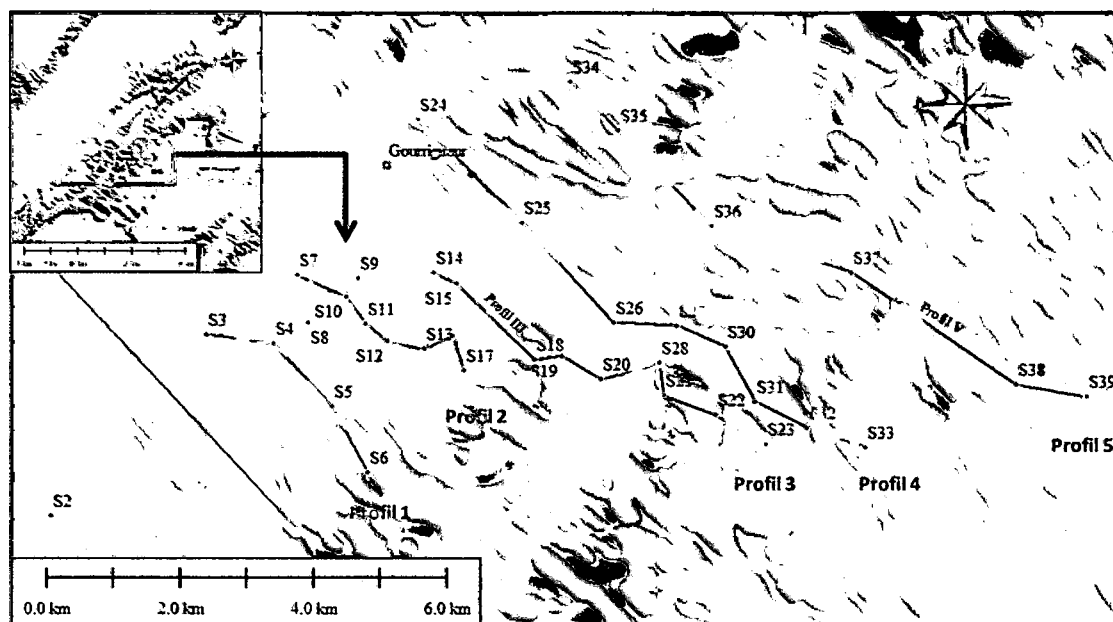


Figure 25 : Répartition des sondages électriques modifiée (in BEREGH (2007))

II.3.2.3. Résultats de l'étude géophysique

L'étude géophysique effectuée par le BEREGH a permis d'établir :

- 5 coupes géoélectriques ;
- 4 cartes de résistivité en ligne (AB = 300, AB = 600, AB = 1000 et AB = 2000 m) ;
- Et la carte de la cote du toit de la formation résistante profonde.

L'interprétation des données de la résistivité a été faite en se basant sur le tableau ci-dessous :

Formations géologiques	Résistivités (Ωm)
Recouvrement superficiel peu épais.	30 - 1700
Argile, argile légèrement graveleuse, marne essentiellement Quaternaire.	7-21
Croutes calcaires plus ou moins indurées Calcaires à silex intercalé - Villafranchien / Eocène	110 - 240
Essentiellement marno-calcaire Thanétien-yprésien Pouvant inclure des croutes calcaires tendres, argileux Villafranchien et des calcaires très fissurés Eocène / Crétacé.	30 - 62
Formation très indurée – Villafranchien / Eocène	710 - 2000
Calcaire fissuré, niveau inférieur- Crétacé.	260 - 500
Calcaire fissuré, niveau supérieur- Crétacé.	150 - 440
Argiles, marnes niveau supérieur- Crétacé.	6 - 21
Calcaires très fissurés, niveau intermédiaire- Crétacé.	50 - 75
Calcaire modérément fissuré- Crétacé.	1000 - 1100

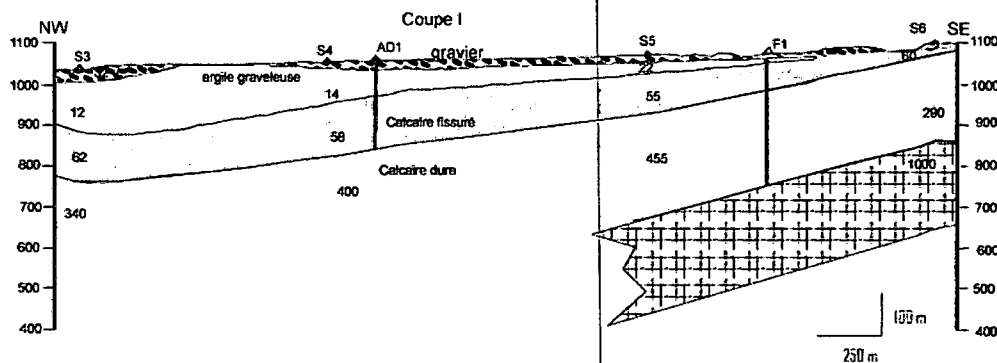
Tableau 7 : Gamme des résistivités adaptée par le BEREGH (2007)

II.3.2.4. Coupes géoélectriques

Profil I (figure 26) :

Cette coupe montre la structure d'un flanc d'un synclinal avec une charnière au niveau de S3. Le flanc Sud-Est est caractérisé par une faible inclinaison. Quatre formations sont présentées dans cette coupe :

- Une première formation très résistante (1000 ohm.m) est reconnue par le sondage S6 à une profondeur de 240 m. Son âge est probablement le Crétacé.
- Vient ensuite une seconde formation résistante (290 – 450 ohm.m), assimilée très partiellement par le forage AD1 à des calcaires éocènes durs mais qui pourrait tout aussi bien correspondre à des calcaires crétacés. L'épaisseur de ces calcaires est de 240 m en S6.
- Les calcaires de l'éocène qui lui succèdent plus haut, présentent une meilleure fissuration avec des résistivités qui varient de 55 à 62 ohm.m. Leur puissance en S6 est de 23 m, atteint les 110 m en S4.
- Des argiles graveleuses quaternaires conductrices (10 – 22 ohm. m) puissantes de 120 m sur l'axe synclinal, surmontée par des formations détritiques peu épais, terminent la série.



Légende:






- | | | | |
|---|---|--|--|
|  | Recouvrement superficiel peu épais |  | Calcaire fissuré, niveau inférieur Crétacé |
|  | Argile, argiles légèrement graveleuses marne essentiellement Quaternaire |  | Calcaire modérément fissuré-Crétacé. |
|  | Essentiellement marno-calcaire Thanétien-yprésien pouvant inclure des croutes calcaires tendres, argileux Villafranchien et des calcaires très fissurés Eocène/crétacé. | | |

Figure 26 : Coupe géoélectrique (Profil I) modifiée (in BERECH (2007))

Profil II (Figure 27)

Cette coupe montre de bas en haut la succession lithologique suivante :

- Formation très résistante (1000 ohm.m) profonde de 170 m en S13 à 190 en S17 surmontée par une couche conductrice (7,3 – 10 ohm.m), épaisse de 51 à 69 m ;
- Calcaires résistants (260 – 500 ohm. m) épais de 61 à 89 m entre S17 et S13 ;
- Calcaire très fissurés (44 – 51 ohm.m). L'épaisseur pourrait atteindre 170 m au niveau du sondage (S7).
- Enfin comblement argileux quaternaire (10 ohm. m), d'une épaisseur de 100 m au niveau du sondage (S11) et mince recouvrement détritique superficiel.

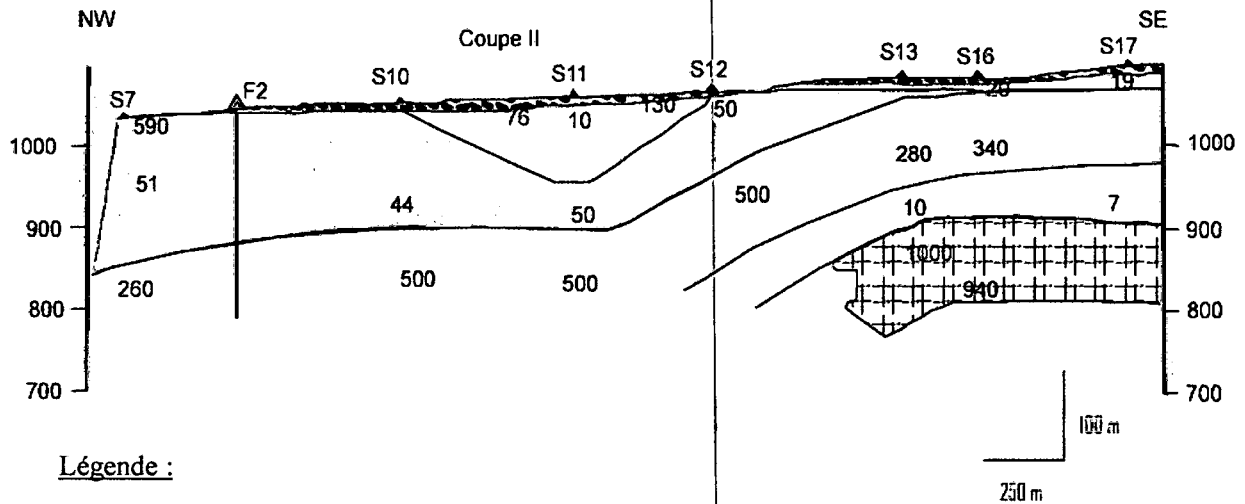


Figure 27 : Coupe géoélectrique (Profil II) modifiée (in BEREGH (2007))

Profil III (Figure 28)

De part et d'autre d'un accident sub-vertical, situé entre les sondages F3 et F4, la coupe montre deux séries de formations d'âge différent :

- Dans la partie Nord Ouest (au niveau des sondages S14 à S20), la coupe géoélectrique 3 montre une structure monoclinale inclinée vers le Nord Ouest comportant sous une mince pellicule détritique quaternaire, une série Eocène-Quaternaire avec :
 - A la base les couches carbonatées du Crétacé, de résistivité comprise entre 400 et 500 ohm.m et qui se situent à une profondeur qui varie de 220 m au niveau du sondage S20 à 410 m en S14 ;
 - Au dessus : des calcaires très fissurés de résistivité allant de 40 à 60 ohm.m, susceptibles d'être localement argileux (25 ohm.m au niveau du S14), l'épaisseur varie entre 150 m au niveau du sondage S20 et 400 m en S14. Ces calcaires peuvent inclure sous forme d'intercalation dans la partie supérieure, des bancs de calcaires plus indurés (130 à 240 ohm.m), épais de 30 à 68 m. L'ensemble se situant dans l'intervalle Crétacé - Eocène - Villafranchien.
- Dans la partie sud Est, une structure crétacée légèrement plissée montre la succession lithologique suivante :
 - Substratum très résistant (1000 ohm.m) profond de 350 m (S21) à 430 m (S23) ;
 - Calcaires probablement très fissurés (50 à 70 ohm.m), épais de 220 m (S22) à 410 m (S23) ;
 - Enfin calcaires fissurés (150 - 440 ohm.m) constituant le niveau crétacé supérieur, son épaisseur atteint les 170 m en S22.

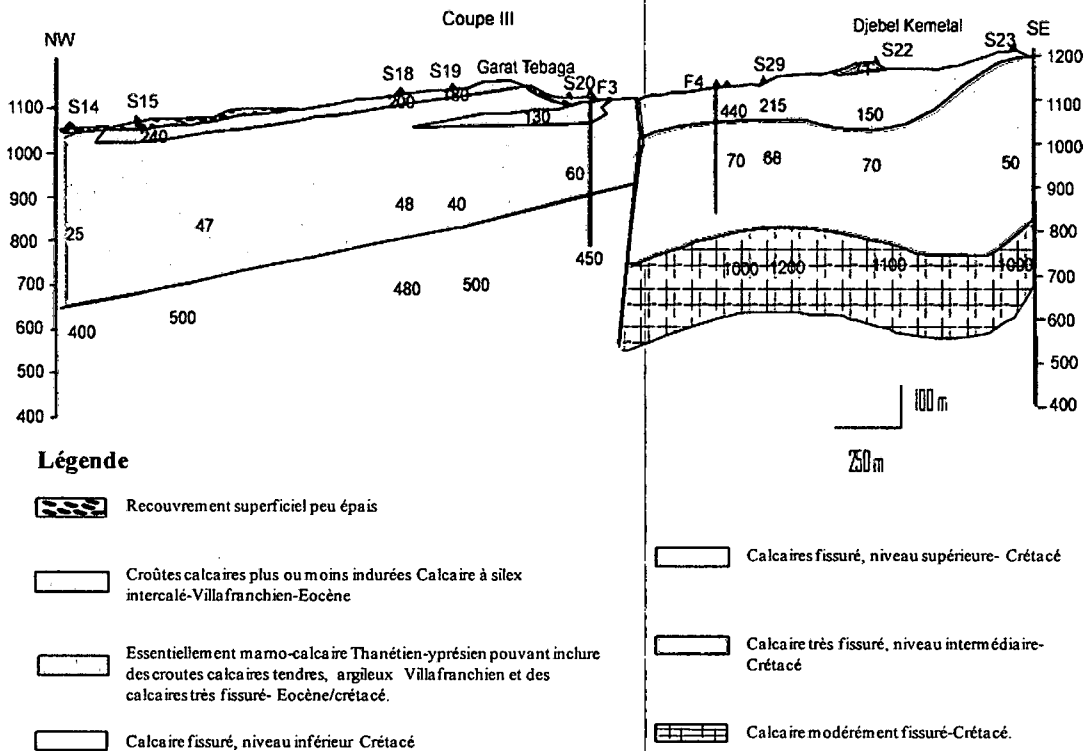


Figure 28 : Coupe géoélectrique (Profil III) modifiée (in BEREGH (2007))

Profil IV (figure 29) :

La coupe géoélectrique 4 montre les spécificités suivantes :

- Dans la partie Sud Est, les formations crétacées du Djebel Kemelal apparaissent intensément plissées. La série comporte un niveau supérieur conducteur (8 à 12 ohm.m), correspond à des formations marneuses, d'épaisseur (53 à 59 m). L'ensemble est surmonté par de dépôts détritiques grossiers. Notons que la structure est effondrée au niveau du sondage (S30).
- Dans la partie Nord Ouest, les calcaires plus ou moins massifs de l'Eocène (500 ohm.m), supportent une série datée de l'Eocène à villafranchien, très intéressante au plan hydrogéologique. L'ensemble présente une épaisseur totale de 410 m au niveau du sondage (S24).

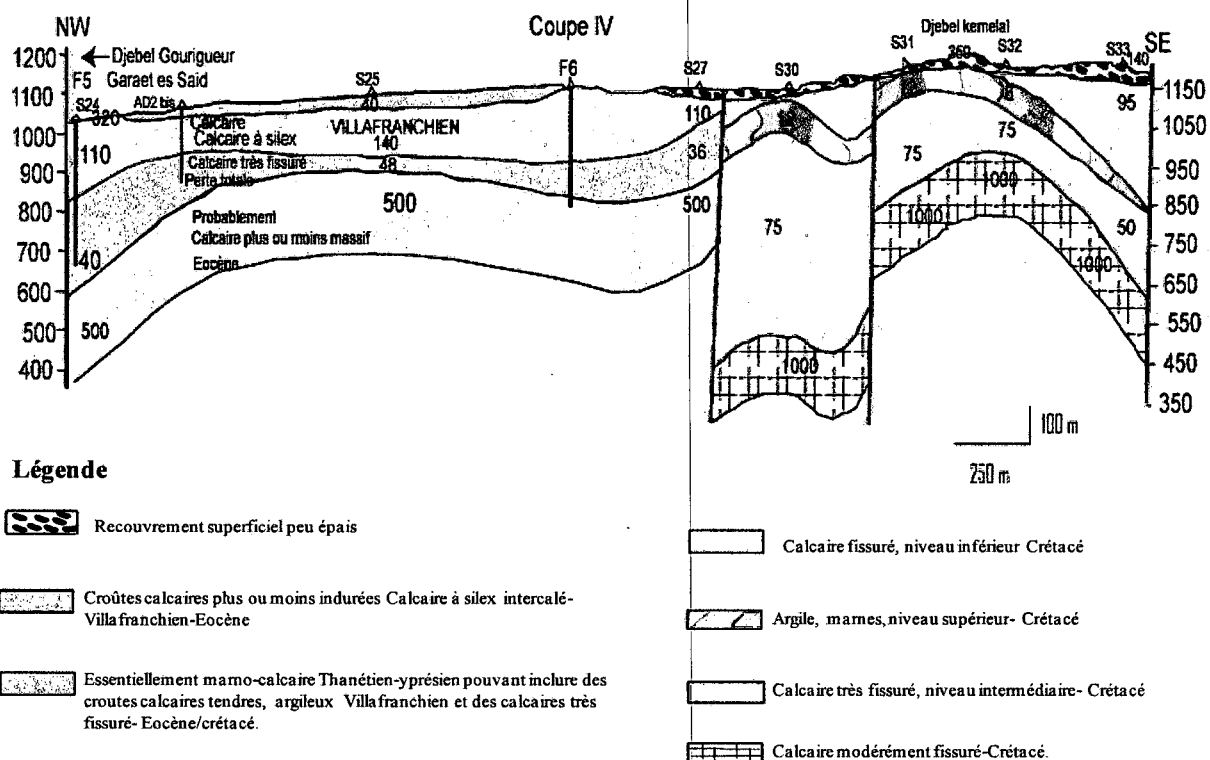


Figure 29 : Coupe géoélectrique (Profil IV) modifiée (in BEREGH (2007))

Profil V (figure 30)

Cette coupe géoélectrique 5 montre :

- L'épaississement considérable de la formation crétacée (62 à 100 ohm.m) depuis le sondage S36 jusqu'au sondage S39, l'épaisseur pourrait atteindre 530 m au niveau du sondage S38.
- L'élévation de la résistivité de la couche profonde datée Eocène ou crétacé (710 à 2000 ohm.m entre les sondages S34 et S36), cette élévation due au changement latérale de faciès (enrichissement en silice du milieu carbonaté) ou d'une réduction de la fissuration.
- Enfin la présence d'un niveau supérieur argileux conducteur de résistivité comprise entre (4 et 11 ohm.m), surmontées par un dépôt détritique.

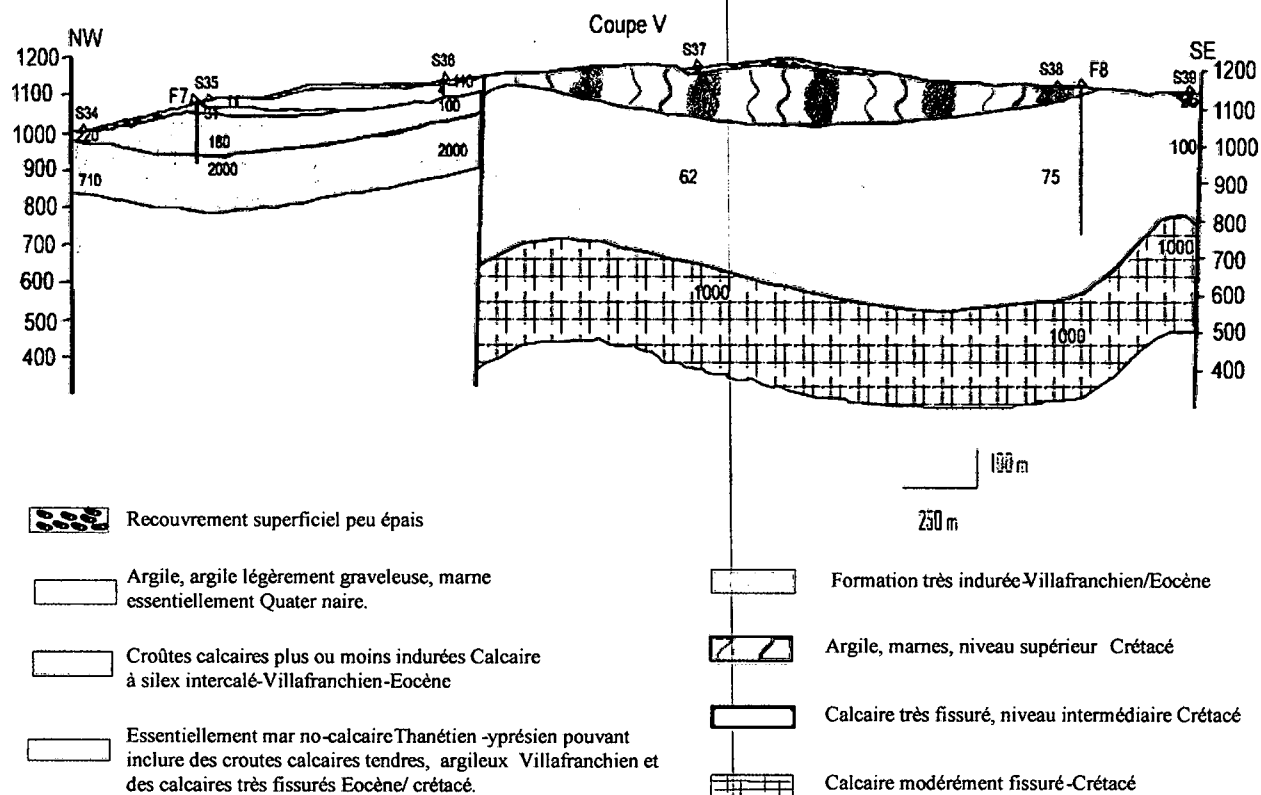


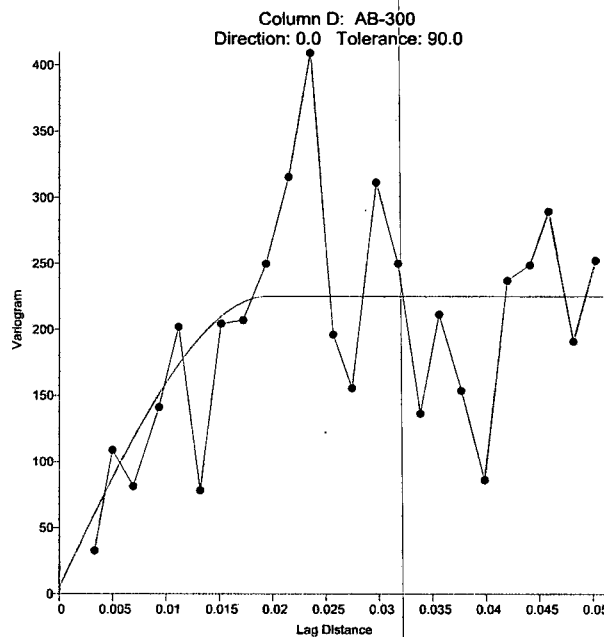
Figure 30 : Coupe géoélectrique (Profil V) modifiée (in BEREGH (2007))

II.3.2.5. Cartes de résistivités

II.3.2.5.1 Carte de résistivité en ligne AB = 300 m

Cette carte a été redessinée en utilisant le krigeage (modèle sphérique + effet de pépité, figure 31), les résultats obtenus sont présentés dans la figure 32.

- Cette carte traduit les résistivités moyennes d'une tranche de terrain d'environ 40 à 75 m d'épaisseur, à partir de la surface, indique une augmentation sensible de la résistivité au sud Est de la zone, en direction des affleurements éocènes formant les Garaets El Baida et Tabaga (entre les sondages S19 et S20).
- Dans ce secteur, les résistivités apparentes varient de 10 à 30 ohm.m sur l'axe S5- S13- S19 à 72 ohm.m en S6.
- Les courbes d'iso-résistivité montrent que l'accroissement de cette dernière se poursuit plus à l'Est sur les reliefs crétacés résistants avec des valeurs de 41 ohm.m au niveau du sondage S38, et 55 ohm.m au niveau de S30.
- Dans la partie Sud-Ouest de la zone on note la présence d'une anomalie conductrice au niveau du sondage S8 (3 ohm.m), qui indiquerait l'existence de dépôts pélitiques peu épais (argile, marne).



Modèle sphérique				Effet de pépité	
Palier	Portée	Rapport d'anisotropie	Angle d'anisotropie	Erreur variance	Micro variance
220	0,02	2	172,4	5	0

Figure 31 : Semi-variogramme AB = 300 m

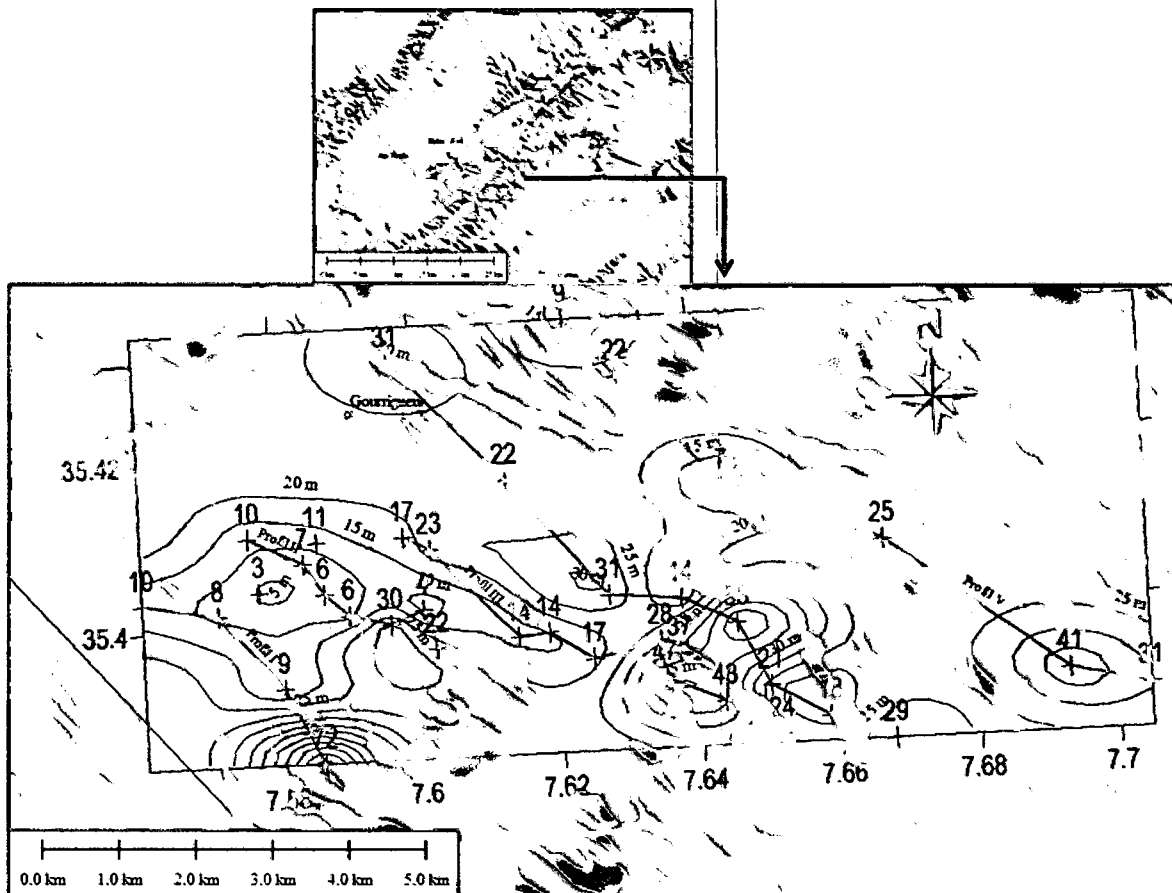
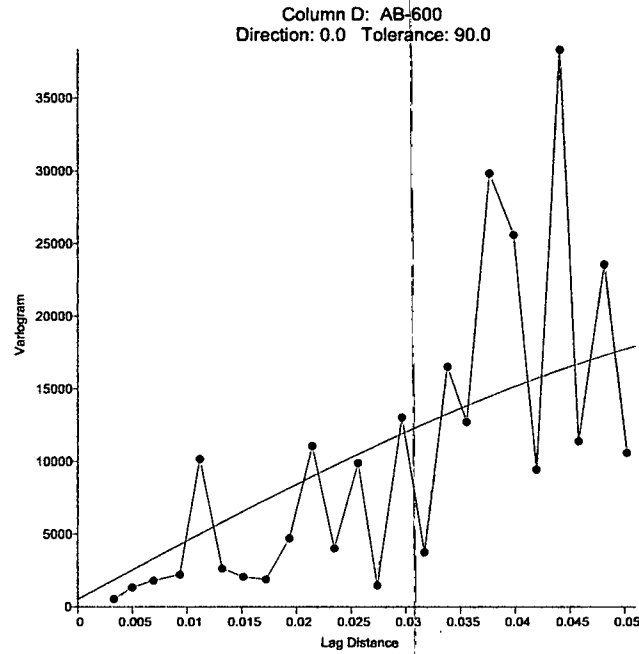


Figure 32 : Carte iso-résistivité AB = 300 m

II.3.2.5.2 Carte de résistivité en ligne AB = 600 m

Cette carte a été redessinée aussi en utilisant le krigeage (modèle sphérique + effet de pépité, figure 33), les résultats obtenus sont présentés dans la figure 34.

- La longueur de ligne adoptée permet une profondeur d'investigation d'une moyenne allant de 75 m à 150 m.
- La carte montre une élévation de la résistivité (atteindre les 300 ohm. m), y compris dans la zone centrale. Cette augmentation traduirait le passage à des formations plus grossières (alluvions quaternaires) ou plus carbonatés (Villafranchien ou l'Eocène).
- Une zone relativement conductrice à prédominance pélitiques et qui est centrée sur l'axe S3 (21 ohm. m) – S4 (28 ohm. m) - S11 (15 ohm. m) – S14 (28 ohm. m).
- Un accroissement plus net des résistivités : au Nord en direction du Djebel Gourrigueur (140 à 623 ohm. m au niveau du sondage S34) et au sud vers Garaets El Baida et Tabaga (80 à 251 ohm. m au niveau du S6)



Modèle sphérique				Effet de pépite	
Palier	Portée	Rapport d'anisotropie	Angle d'anisotropie	Erreur variance	Micro variance
20 000	0,08	2	166,1	500	0

Figure 33 : Semi-variogramme AB = 600 m

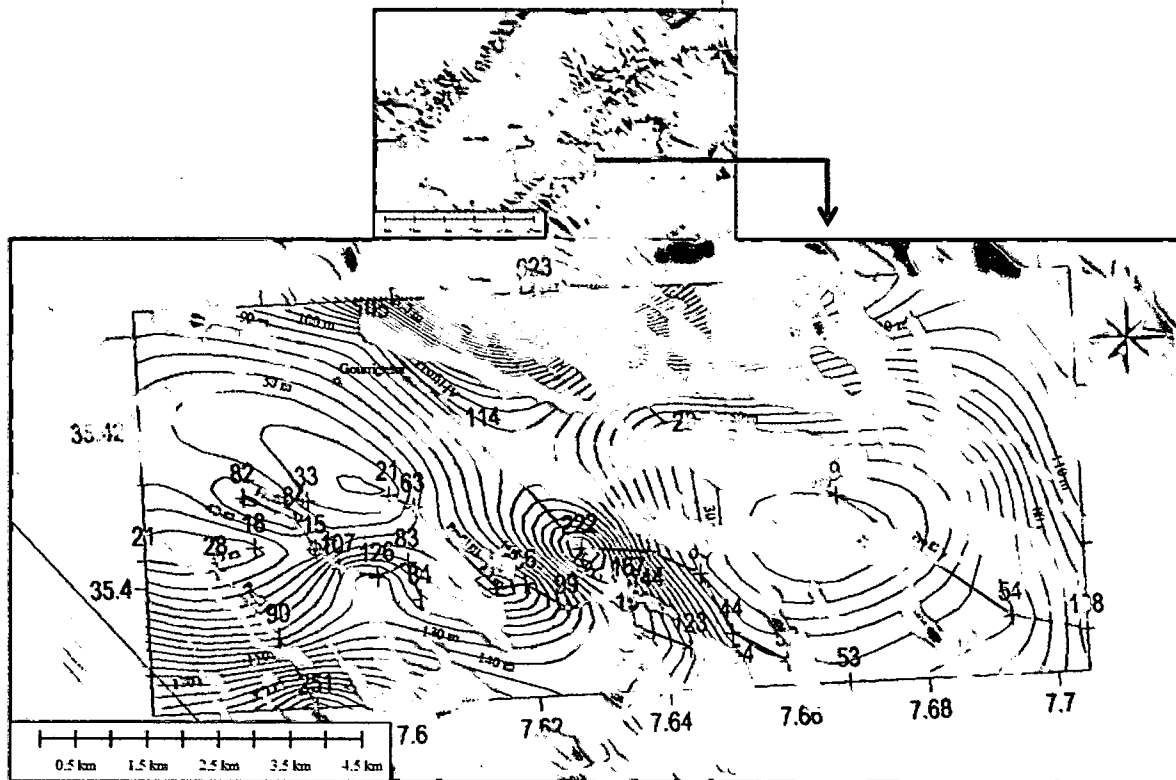


Figure 34 : Carte iso-résistivité AB = 600 m

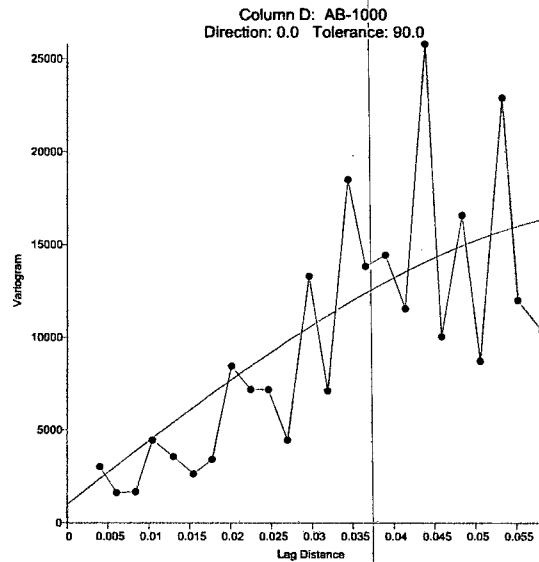
II.3.2.5.3 Carte de résistivité en ligne AB = 1000 m

Cette carte a été redessinée en utilisant le krigeage (modèle sphérique + effet de pépité, figure 35), les résultats obtenus sont présentés dans la figure 36.

Cette carte montre une nette augmentation de résistivité (jusqu'à 540 ohm.m), sur une tranche de terrains comprise entre 175 et 200 m de profondeur.

Ce document montre :

- La prédominance des faciès carbonatés sur toute la zone centrale.
- L'influence du faciès pélitique au Sud Ouest, sur l'axe S3 – S2.
- L'augmentation brutale des résistivités en direction des affleurements éocènes, au Nord (538 ohm. m au niveau du S34) et au Sud (328 ohm. m au niveau du S6)



Modèle sphérique				Effet de pépité	
Palier	Portée	Rapport d'anisotropie	Angle d'anisotropie	Erreur variance	Micro variance
16 000	0,07	1	0	1 000	0

Figure 35 : Semi-variogramme AB = 1000 m

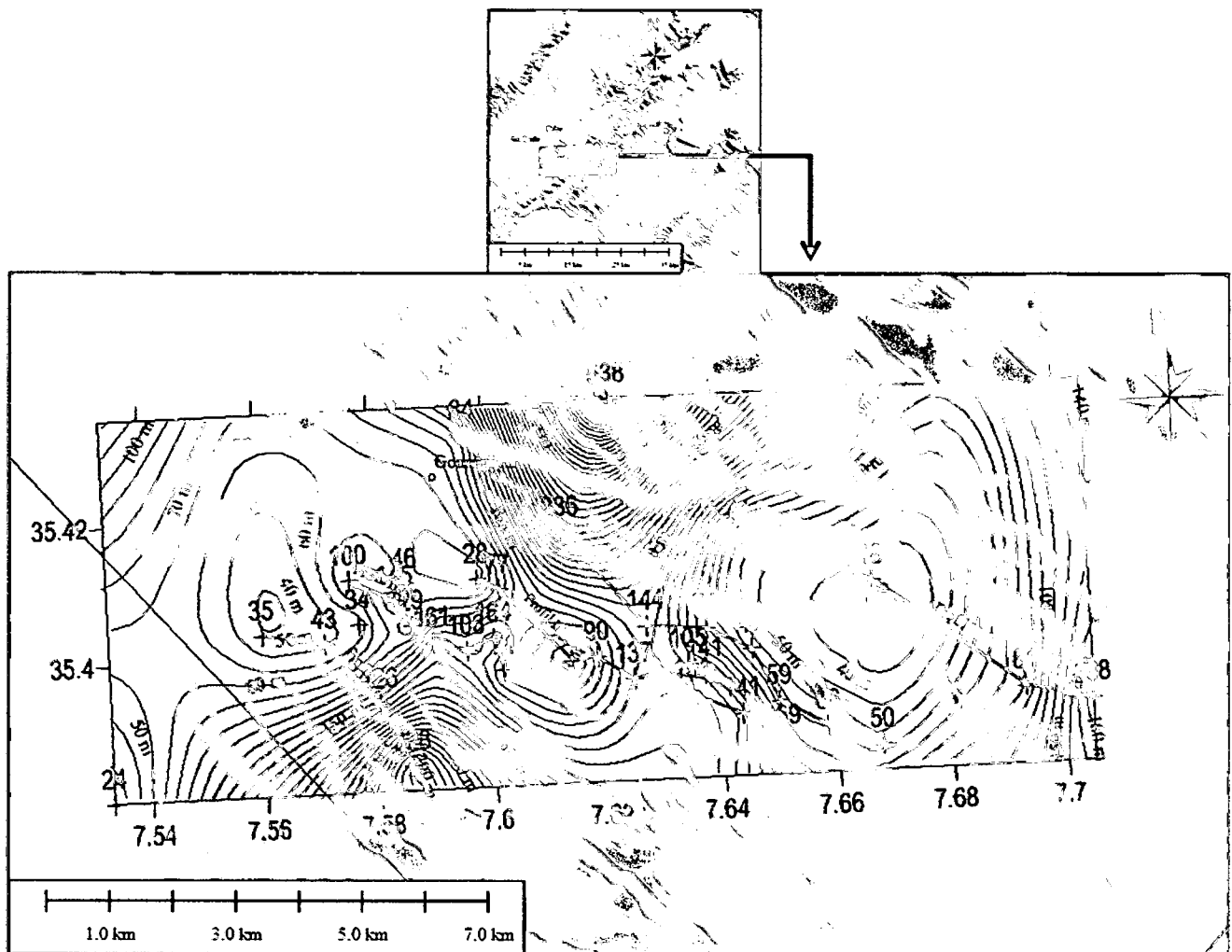


Figure 36 : Carte iso-résistivité AB = 1000 m

II.3.2.5.4 Carte de résistivité en ligne AB = 2000 m

Cette carte a été redessinée en utilisant le krigeage (modèle sphérique plus l'effet de pépité, figure 37), les résultats obtenus sont présentés dans la figure 38.

Dans la partie Est, sur les formations crétacées les valeurs de résistivité sont de l'ordre de (96 ohm. m au niveau de S32, 86 ohm. m en S33, 68 ohm. m en S30) ce qui pourrait s'expliquer par l'existence de couches épaisses très fissurées.

Par contre une valeur de 259 ohm.m au niveau du sondage S39 peut s'expliquer par un redressement rapide du substratum crétacé.

Dans la partie Sud Ouest les valeurs enregistrées sur l'axe S3 (63 ohm. m) – S2 (34 ohm. m) pourraient indiquer un approfondissement dans le même sens du substratum résistant profond.

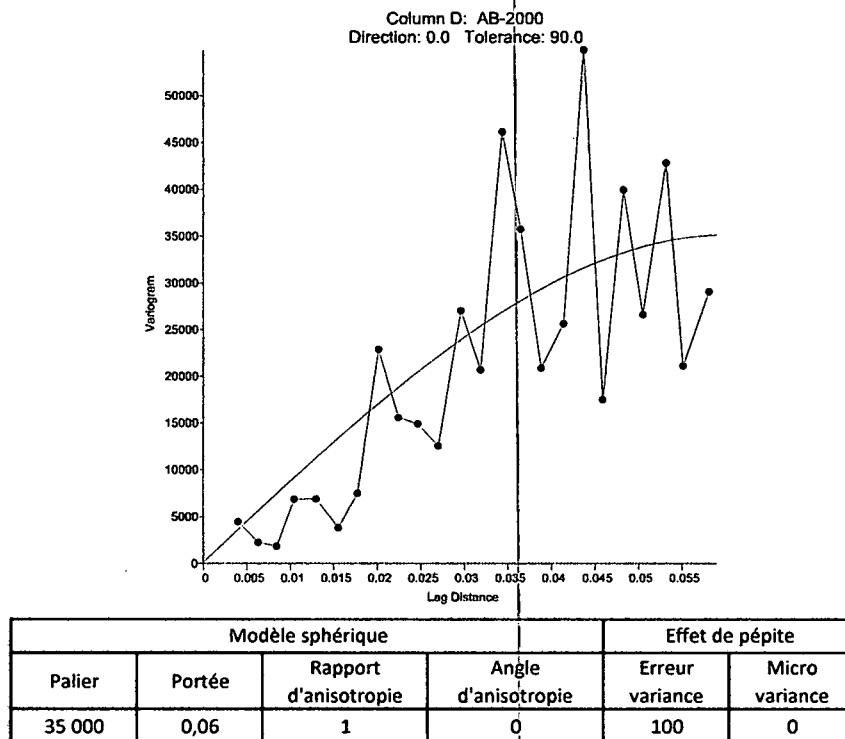


Figure 37 : Semi-variogramme AB = 2000 m

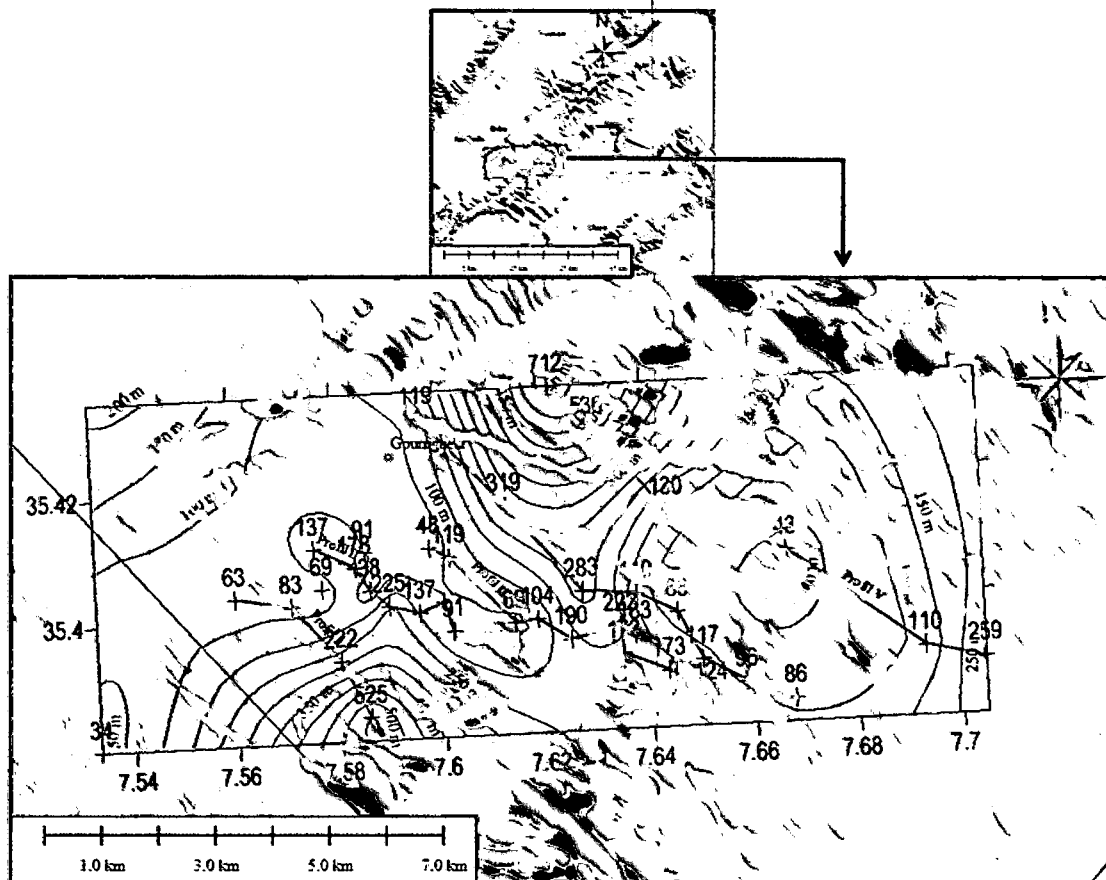


Figure 38 : Carte iso-résistivité AB = 2000 m

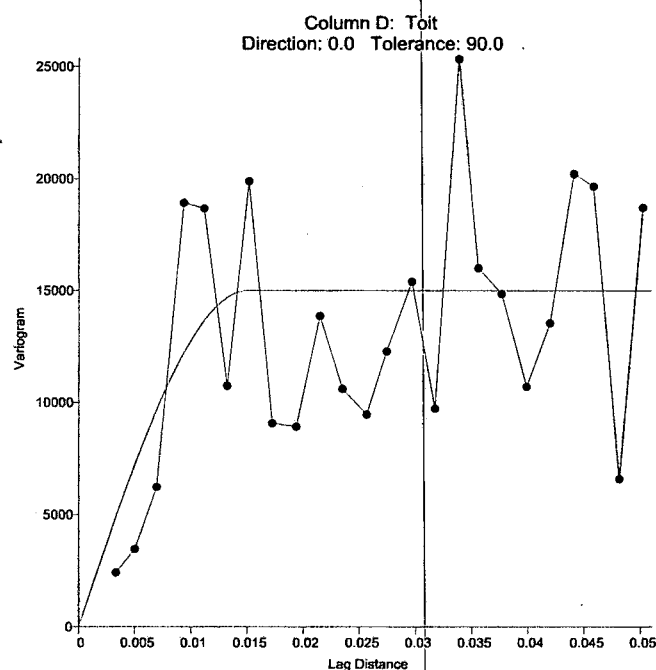
II.3.2.5.5. Carte de la côte du toit de la formation résistante profonde

Cette carte a été redessinée en utilisant le krigeage (modèle sphérique + effet de pépite, figure 39), les résultats obtenus sont présentés dans la figure 40.

Cette carte présente une configuration chahutée traduisant la présence de hauts fonds séparés de fosses profondes.

Une zone dépressionnaire de direction NNW – SSE, parcourt les sondages S24, S14 et S18. Cette zone est limitée à l'Ouest par un haut fond de même direction, qui s'amorce en S7 – S8, s'élargit amplement sur l'axe S5 – S16, pour se refermer enfin à l'aplomb des affleurements éocènes de la Garaets Tabaga.

A l'Est la carte montre des fosses de forme ramassée centrées sur les sondages S30 et S38, que séparent des dômes axés sur S32 et S39.



Modèle sphérique				Effet de pépite	
Palier	Portée	Rapport d'anisotropie	Angle d'anisotropie	Erreur variance	Micro variance
15 000	0,015	1	0	0	0

Figure 39 : Semi-variogramme du toit de la formation résistante profonde

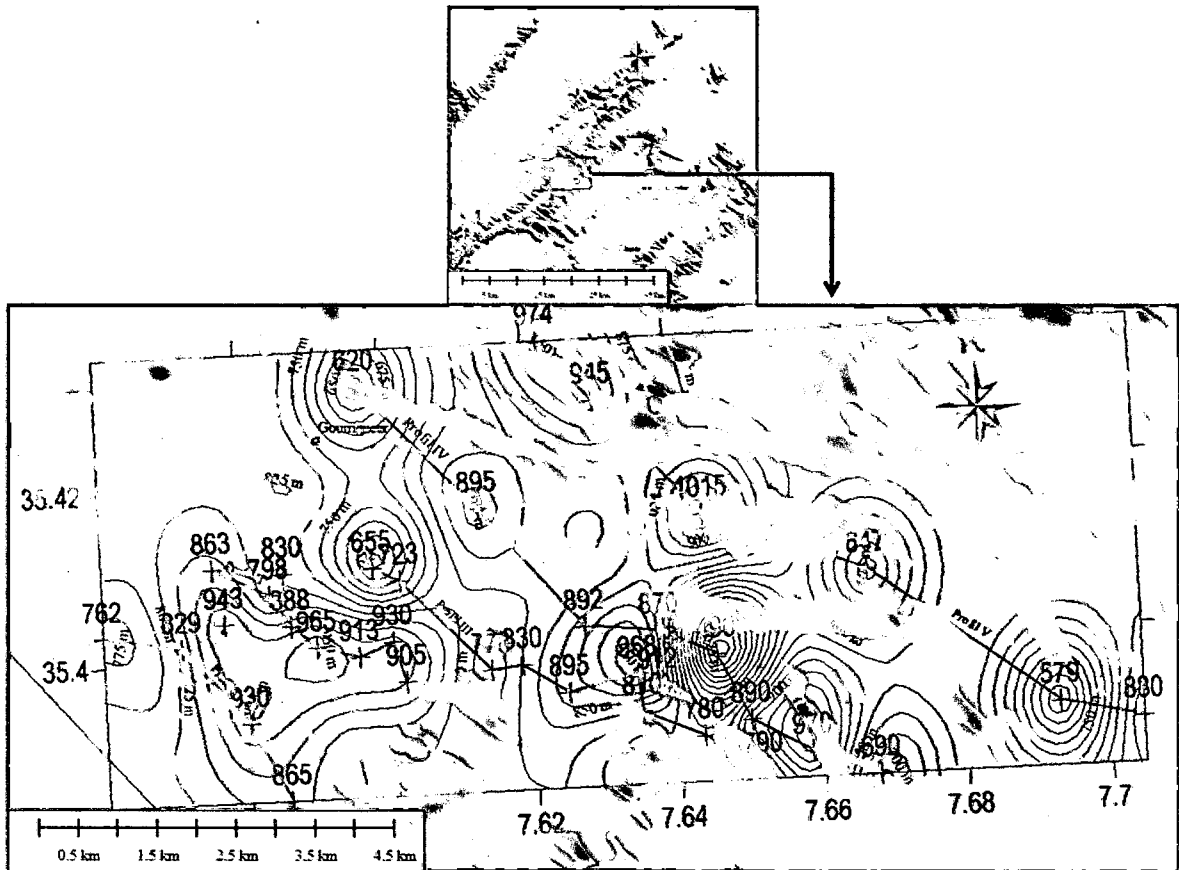


Figure 40 : Carte de la côte du toit de la formation résistante profonde

II.3.3. Etude géophysique de la région de Bir Mokadam

L'étude géophysique de la région de Chéria est basée principalement sur la prospection géoélectrique menée par la société TRANSAKTA-GEOMETAL en 1971 et la CGG en 1970 (figure 41).

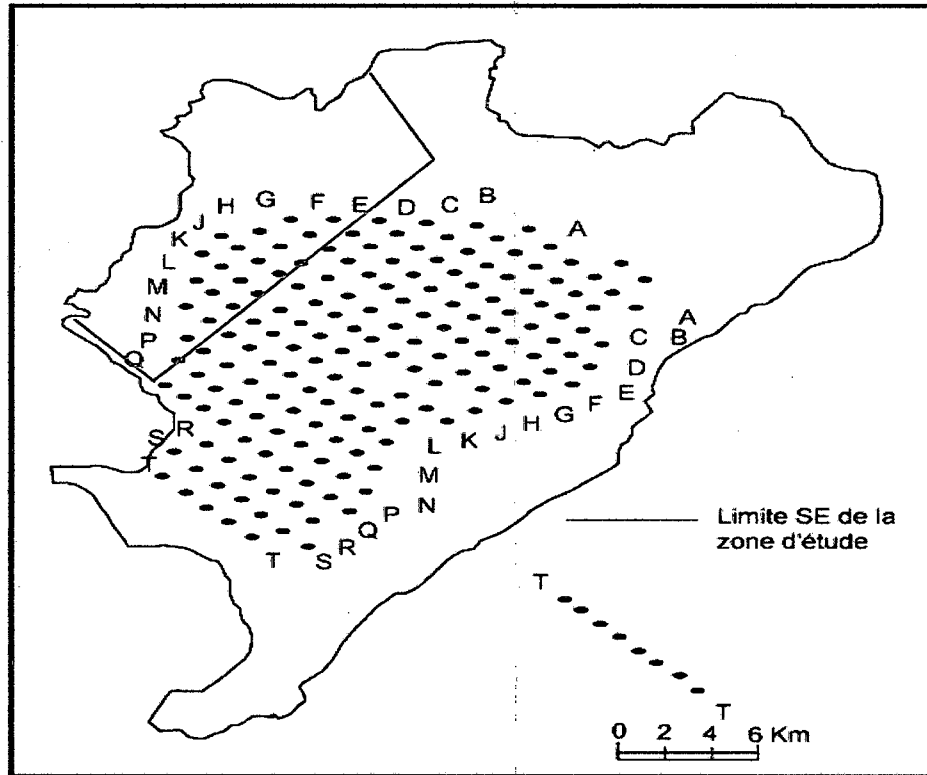


Figure 41 : Répartition des sondages électriques (CGG 1970 in Chamekh, 2011)

II.3.3.1. Interprétation des coupes géoélectriques

L'observation des coupes géoélectriques a permis la conclusion des résultats suivants :

a) Formation anté-miocène

Dans la zone Nord les coupes de B à L sont particulièrement simples. Elles traduisent bien la structure synclinale de l'Eocène, du Danien et du Maestrichtien. Dans cette zone les épaisseurs sont respectivement constantes (200 à 250 m) pour des résistivités de l'ordre de 200 à 300 ohm.m (Figure 42).

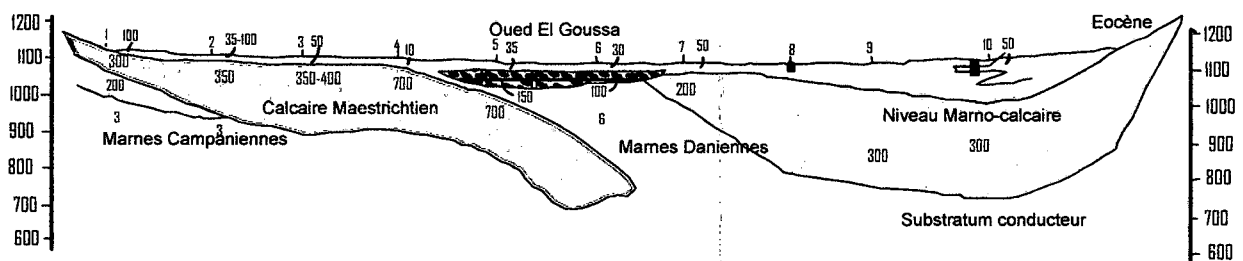


Figure 42 : Coupe géoélectrique H modifiée (in CGG 1970)

Les épaisseurs du Danién semble plus variables elles diminuent du Nord vers le sud (400 à 250 m) L'épaisseur moyenne des calcaires maestrichtiens semble être de l'ordre de 250 m mais difficile à estimer (figure 43), d'autant plus qu'ils comportent souvent une partie sèche très résistante. Ils sont érodés dans la partie Ouest.

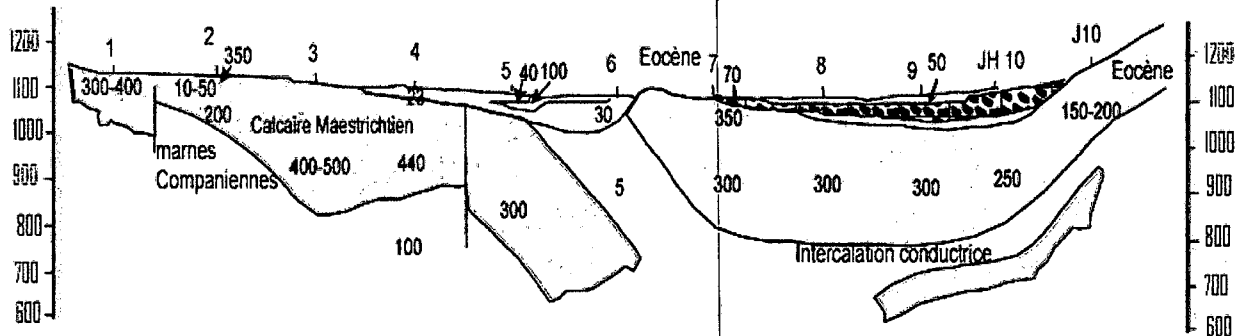


Figure 43 : Coupe géoélectrique (Profil J) modifiée (in CGG 1970)

b) Recouvrement

Le remplissage continental dans la partie Nord Est constitué généralement de trois niveaux.

- Un niveau superficiel dont la résistivité est en général comprise entre 20 et 40 ohm.m.
- Un niveau résistant (70 – 100 ohm. m) correspondant à des éléments grossiers (galets plus ou moins symétriques). Ce niveau est développé d'avantage le long de la bordure Est du bassin et semble provenir de la destruction du massif (profils D, E, F, G et H). L'épaisseur pourrait atteindre 30 – 40 m (figure 44).
- Un troisième niveau plus conducteur, (10-20 ohm. m) souvent épais, constitue le remplissage principal au cœur du synclinal. Le remplissage des plaines dépasse par fois la centaine de mètre (Oued el Guelta, el Goussa à l'Ouest). En surface existe également un niveau grossier.

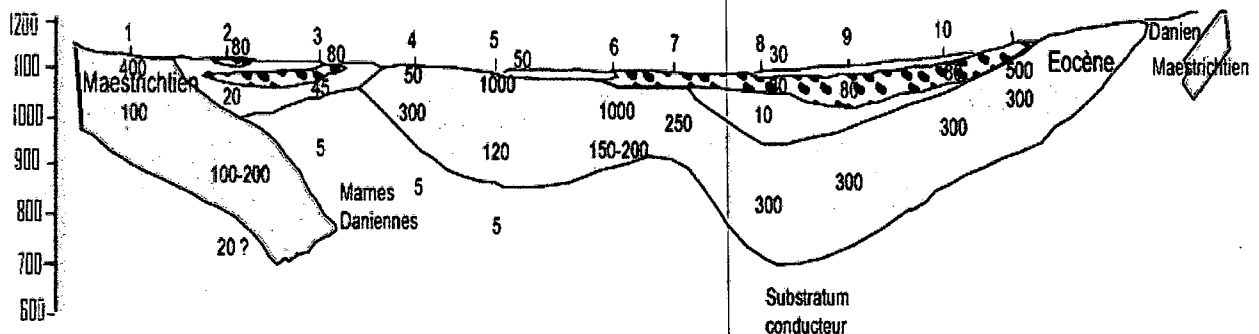


Figure 44 : Coupe géoélectrique E modifiée (in CGG 1970)

II.3.4. Conclusion

Cette étude géophysique nous a permis de confirmer l'existence des plissements (synclinaux et anticlinaux) et des failles dans la partie couverte par les alluvions de notre zone d'étude (plaines) ; de retracer les cartes d'isovaleur par la méthode de krigeage et de déterminer la géométrie de chaque couche géologique.

Chapitre III

Matériel et méthodes



III.1. Introduction

Dans cette partie nous exposeront les différents équipements scientifiques que nous avons utilisés pour réaliser ce travail de recherche ainsi que les méthodes suivies pour obtenir les résultats.

III.2. Suivi spatio-temporel

III.2.1. Choix des stations de mesures

Les points d'eau de prélèvement ont été choisis en fonction :

- De la nature géologique de l'aquifère capté : nous avons ciblé quatre formations calcaires exploitées dans la région :
 - les formations calcaires du Maestrichtien : présentées par les forages (D1, F2 et AD2-T) ; les piézomètres (Pz-F2 et Pz-PM et Pz-AD2-T) et la source (S-RD) ;
 - les formations calcaires de l'Eocène : présentées par les forages (AD1-G, AD2-G) et le piézomètre (Pz-AD2-G) ;
 - les formations calcaires du Turonien : présentées par les forages (L5, G4-5 et F7) et le piézomètre (Pz-M)
- De l'état hydrodynamique de la nappe :
 - statique : sans pompage, dans notre zone étude, il est présenté par les piézomètres ;
 - dynamique : en pompage, il est présenté par les forages.
- La nature du plissement : afin de comparer le comportement hydrodynamique des aquifères plusieurs endroits ont été choisis :
 - Synclinal : sur le flanc NW du synclinal de Bir-Mokadam et celui de Gourrigueur et sur l'axe du synclinal de Gourrigueur
 - Anticlinal : la charnière de l'anticlinal de Meskiana.
- L'accessibilité au forage.

L'ensemble des forages choisis pour cette étude sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Nom	X (m)	Y (m)	Profondeur du forage (m)	Formation géologique captée	Débit (L/s)	Endroit
F2	956 843,13	241 635,94	150	Calcaire Maestrichtien	60	flanc du synclinal de Bir-Mekadem
D1	956 880,02	241 636,73	150	Calcaire Maestrichtien		
Pz-F2	956 831,27	241 377,66		Calcaire Maestrichtien		
Pz-BM	957 469,52	245 206,70	120	Calcaire Maestrichtien		
AD2-T	939 208,15	247 081,58		Calcaire Maestrichtien		Flanc NW du synclinal de Gourrigueur
Pz-AD2-T	939 622,77	247 064,43	220	Calcaire Maestrichtien		
S-RD	939 851,65	247 923,12		Calcaire Maestrichtien	50	
AD1-G	941 450,71	245 759,60	220	Calcaire Eocène		Axe du synclinal de Gourrigueur
AD2-G	944 004,94	247 615,46	170	Calcaire Eocène	33	
Pz-AD2-G	942 095,58	246 750,19	200			
L5	936 328,99	253 003,32	125	Calcaire Turonien	5	Charnière de l'anticlinal de Meskiana
G4-6	940 034,80	257 240,43	105	Calcaire Turonien	12	
F7	942 871,17	258 418,33				
Pz-M	947 035,90	266 867,35	130		15	

Tableau 8 : Caractéristiques des points d'eau

III.2.2. Choix du pas temps du suivi

Pour réaliser le suivi hydrodynamique et hydrochimique des eaux souterraines des formations calcaireuses, nous avons opté pour un suivi saisonnier. Au total quatre campagnes ont été réalisées :

- la première campagne, du 9 au 10 avril 2013 ;
- la deuxième campagne, du 14 au 17 juin 2013 ;
- la troisième campagne, du 22 au 25 septembre 2013 ;
- et la quatrième campagne, du 10 au 14 février 2014.

III.3. Positionnement géographique des points d'eau

Pour localiser les points d'eau, nous avons utilisé trois outils : le GPS, Google earth et les cartes topographiques.

- **Le GPS « Global Positioning System » ou le système de positionnement global**

C'est un appareil de pointe qui permet de donner la position exacte (en 3 dimensions : latitude (X), longitude (Y) et l'altitude (Z)) du lieu au niveau duquel on se trouve et où l'on a effectué la mesure.

Le GPS que nous avons utilisé pour localiser nos points d'eau est de marque GARMIN « GPS MAP 62 S ».



Photo 3 : GPS MAP 62 S

Vu la précision du GPS pour les coordonnées X et Y (inférieure à ± 10 m), nous l'avons utilisé pour le positionnement des points d'eau (piézomètres, forages et sources). Pour les valeurs de Z, nous n'avons pas utilisé les données fournies par le GPS, car les valeurs obtenues présentent un grand écart (une erreur de ± 3 m) par rapport aux données de l'altitude de la carte topographique.

- **Google Earth**

Google Earth est un logiciel, propriété de la société Google, permettant une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Ce dernier a été utilisé pour obtenir les valeurs de Z à partir de ses données MNT. La précision de ces mesures est de $\pm 0,5$ m.

- **Carte topographique**

Dans le cas où nous avons un doute dans les coordonnées géographiques nous vérifierons les coordonnées dans les cartes topographiques.

La position des points d'eau est présentée dans la figure ci-dessous :

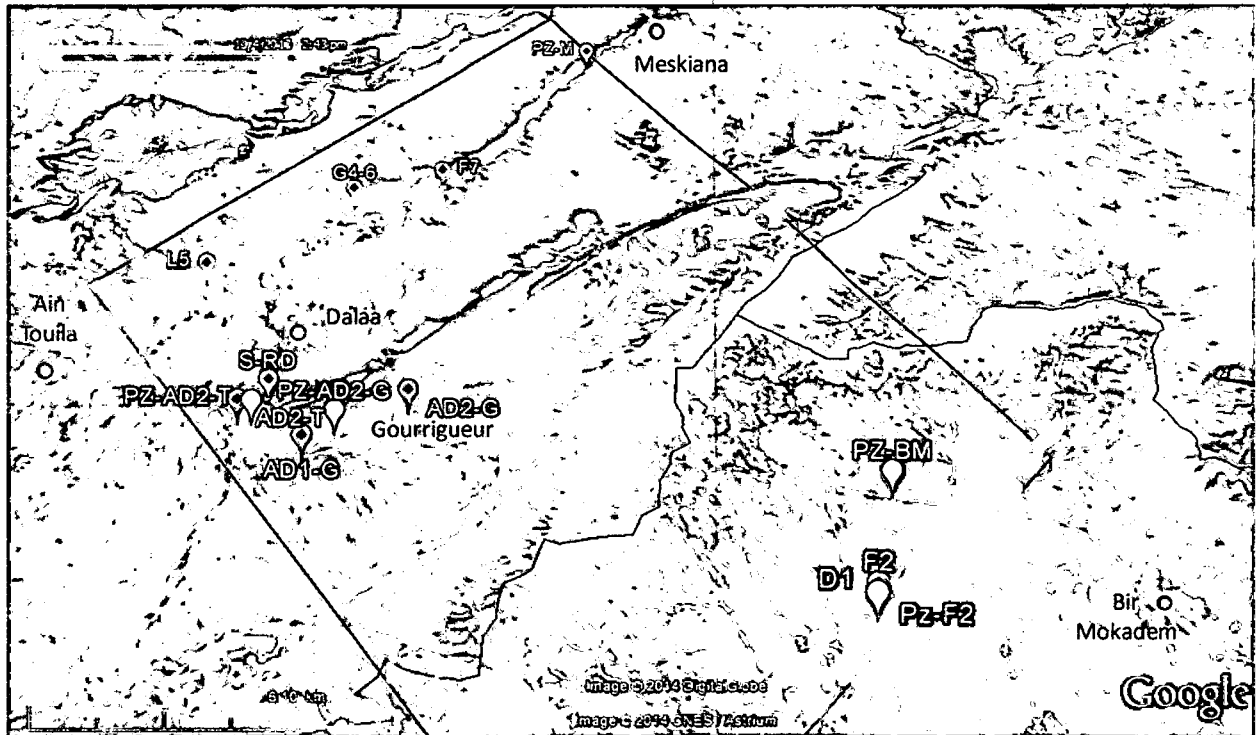


Figure 45 : Position des points d'eau sur l'image de Google Earth

III.4. Mesure du niveau piézométrique

Pour la mesure du niveau d'eau (statique et dynamique) des différents points d'eau, nous avons utilisé une sonde lumineuse possédant un voyant qui s'allume une fois que le bec de la sonde est en contact avec la surface de l'eau.

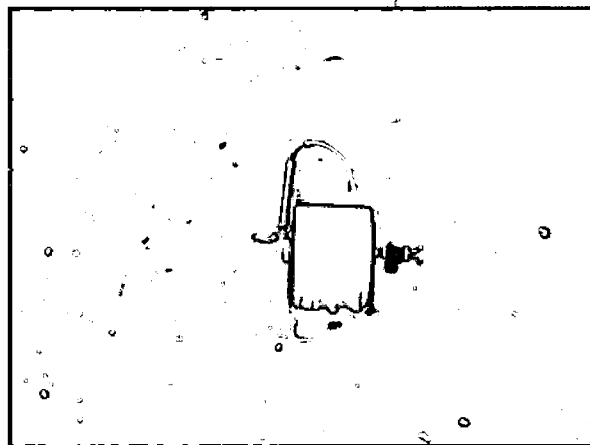


Photo 4 : Sonde lumineuse

III.5. Prélèvement d'eau

Pour chaque station, on a prélevé deux bouteilles, étiquetées pour éviter tout risque de confusion entre les échantillons (nom de station, date...), rincées au moins trois fois avec de l'eau à analyser afin d'éviter toute contamination de l'échantillon.

Les prélèvements d'eau dans les forages ont été faits par pompage.

III.6. Conservation des échantillons

Les échantillons sont conservés à l'abri de la lumière.

III.7. Mesures des paramètres physicochimiques et des éléments chimiques

III.7.1. Les paramètres physico-chimiques

Les mesures des paramètres physico-chimiques (conductivité, T, pH, O₂ dissous) ont été faites in-situ à l'aide d'un multiparamètre de terrain (Multi 350i de marque WTW).

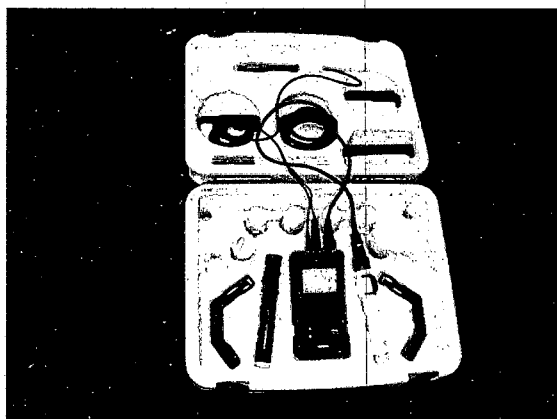


Photo 5 : Multiparamètres 350i

III.7.2. Analyse des éléments chimiques

L'analyse des éléments chimiques ont été faites au laboratoire par trois méthodes :

III.7.2.1. Méthode titrimétrie : elle est utilisée pour la détermination de la dureté totale, le calcium, les chlorures et les bicarbonates.

a) Détermination de la dureté totale

Méthode titrimétrie à l'EDTA

Mode opératoire : Introduire 50 ml d'eau à analyser dans une fiole conique de 250 ml, ajouter 4 ml de solution tampon pH 10 et 3 gouttes d'indicateur au noir ériochrome T. La solution doit se colorer en rouge foncé ou violet, le pH doit être de 10 en maintenant une agitation, verser la solution d'EDTA rapidement au début puis goutte à goutte jusqu'au virage du violet au bleu. Noter le volume versé VEDTA.

b) Détermination de calcium**Méthode titrimétrie à l'EDTA**

Mode opératoire : A l'aide d'une pipette, introduire 50 ml d'eau à analyser dans une fiole conique de 250 ml. Ajouter 3 ml de la solution d'hydroxyde de sodium et 2 à 3 gouttes de la solution de bleu d'ériochrome. La solution doit se colorer en rouge foncé ou violet. Titrer immédiatement avec l'EDTA jusqu'au virage du violet au bleu.

c) Détermination des chlorures**Méthode argentrimétrie (Norme NF T 90- 014)**

Principe et mode opératoire : Les ions chlorurés précipitent à l'état de chlorure d'argent par une solution titrée de nitrate d'argent (AgNO_3). L'indicateur de fin de réaction est le chromate de potassium (K_2CrO_4) qui, en présence d'un excès d'ions d'argent, forme un précipite rouge. A l'aide d'une pipette jaugée, introduire 100 ml d'eau à analyser dans un Erlene Meyer de 250 ml. Vérifier à la phénolphtaléine, autrement dit l'absence de coloration rose après ajout de 2 à 3 gouttes de cet indicateur. Ajouter 1 ml de chromate de potassium et doser par l' AgNO_3 jusqu'au virage à la teinte brunâtre. Noter le volume versé $V \text{ AgNO}_3$ ml. (Rejsek, 2002).

d) Détermination des Bicarbonates (HCO_3^-)

La concentration des bicarbonates est calculée selon la relation suivante :

$$[\text{HCO}_3^-] = \text{TAC (F}^\circ) \times 12,2 \text{ (Rodier, 1996)}$$

TAC: Alcalinité totale $1 \text{ F}^\circ = 10 \text{ mg/l}$

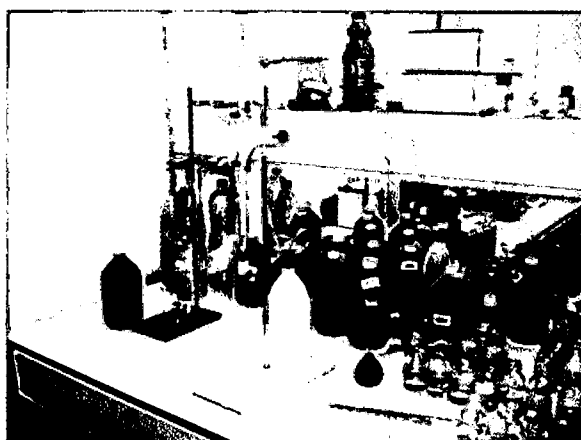


Photo 6 : Matériel utilisé dans la méthode titrimétrie

e) Détermination des sulfates (SO_4^{2-})**Méthode néphélométrique**

Mode opératoire : Introduire 39 ml d'eau à analyser dans un tube à essai, ajouter 1 ml d'acide chlorhydrique au 1/10 et 5 ml de la solution de chlorure de baryum. Agiter énergiquement et laisser reposer 15 minutes. Agiter de nouveau et faire les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 650 nm.

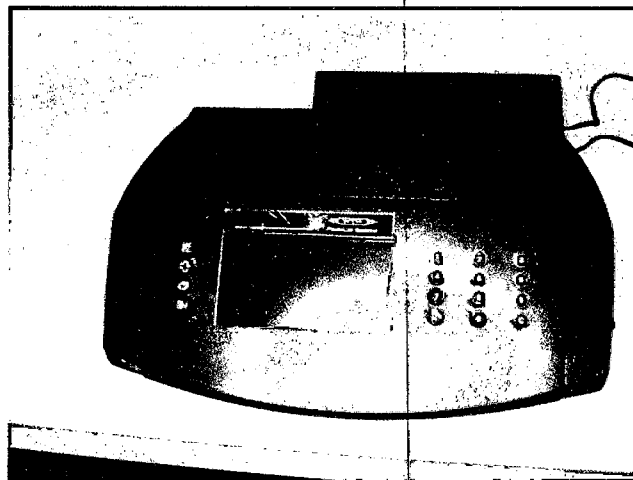


Photo 7 : Spectrophotomètre

f) Détermination de Magnésium

Le magnésium est estimé par la différence entre la dureté et le calcium exprimés en CaCO_3 mg /l. (Rodier, 2005).

$$[\text{TH}] = [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Ca}^{2+}]$$

$$[\text{Mg}^{2+}] = [\text{TH}] - [\text{Ca}^{2+}]$$

g) Détermination de sodium et potassium

Le sodium et potassium est estimé par la différence entre les anions et les cations exprimés en mé/l.

$$[\text{Na}^+ + \text{K}^+] = [\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$$

8. Logiciels

Pour traiter nos données, nous avons utilisé les logiciels suivants :

- Global mapper 13 : pour limiter le bassin versant et tracer le réseau hydrographique ;
- Google Earth : pour localiser les points d'eau
- Diagrammes : pour classer et comparer les eaux entre elles ;
- Adobe Illustrator 10 : pour refaire les schémas, les cartes et les coupes.
- Statistica 6 : pour faire les analyses statistiques

Chapitre IV
Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Le comportement hydrodynamique et hydrochimique des aquifères carbonatés représente la base pour connaître le fonctionnement de l'aquifère. Dans cette partie, nous traiterons nos données hydrodynamiques et hydrochimiques obtenus à partir de notre suivi trimestriel réalisé pendant la période du 9 avril 2013 au 14 février 2014. Nous commencerons par la partie hydrodynamique pour connaître le comportement de la nappe au pompage et la circulation des eaux souterraines, puis nous poursuivrons par la partie hydrochimique, pour connaître la signature chimique de la nappe ainsi que son évolution spatiotemporelle.

IV.2. Fonctionnement hydrodynamique du système aquifère

IV.2.1. Introduction

Le fonctionnement hydrodynamique dans le milieu fissuré est très complexe, vu qu'il y a plusieurs facteurs qui le contrôlent :

- La perméabilité : dans ce type d'aquifère la perméabilité est en grand, vu qu'elle est contrôlée par la fissuration liée en grande partie à la tectonique (plissements et failles). La circulation des eaux souterraines dans ce type d'aquifère suit la différence de charge entre deux points connectés par une ou des fissures ;
- La connexion des fissures : l'eau circule souterrainement lorsqu'il y a une connexion entre les fissures, dans le cas contraire l'eau stagnera ;
- L'orientation des fissures : elle est liée à la nature et la direction des contraintes produites sur les formations géologiques (figure 46),
- La nature géologique du substratum : lorsque le substratum est imperméable, il permettra une bonne accumulation des eaux dans l'aquifère, par contre lorsque le substratum est semi-perméable, il permettra des fuites d'eau et donc une diminution de la réserve de l'aquifère.

IV.2.2. Fonctionnement hydrodynamique dans la zone d'étude

Dans notre zone d'étude les formations géologiques qui composent les aquifères sont des calcaires fissurés, vu la tectonique (plissements et failles (figure 22) qui caractérisent la région, ce qui implique une perméabilité en grande :

- Les plissements (synclinaux et anticlinaux) : l'orientation de leurs axes est NE-SW. Les formations calcaires qui composent ces plissements, affleurent seulement dans les sommets des montagnes, où on observe une forte fissuration (photo 8). Par contre dans les plaines, les calcaires sont couverts par des alluvions.

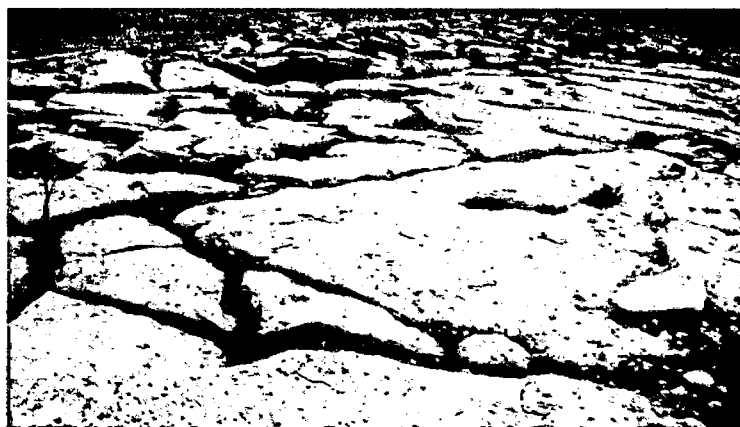
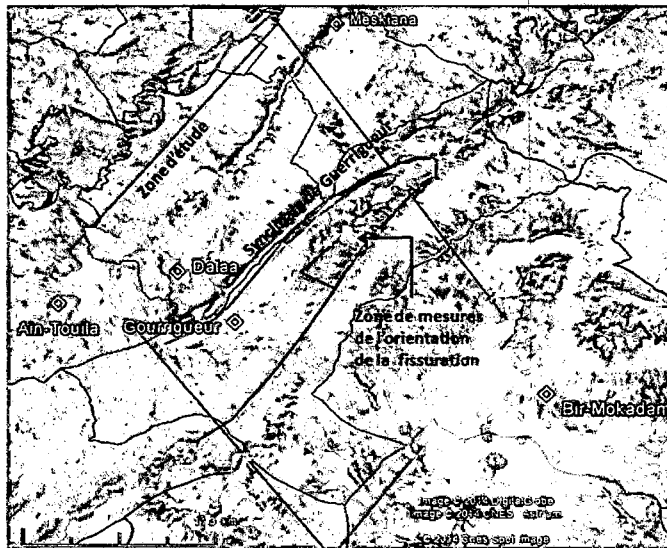
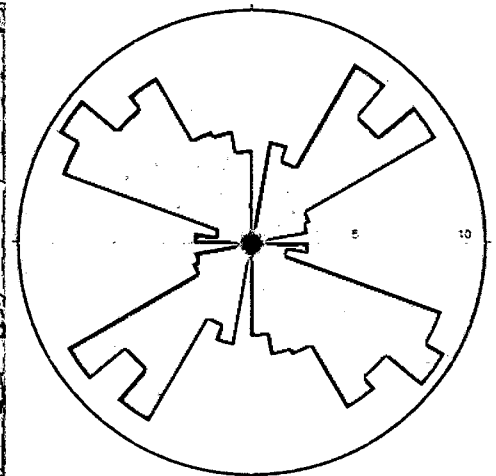


Photo 8 : Distribution de la fissuration (flanc NW du synclinal de l'Ain Dalaa)

Une étude de l'orientation de la fissuration réalisée par Hireche Saad (figure 46) montre que la fissuration dans le flanc Sud-Est du synclinal de Gourrigueur a deux directions principales : l'une axiale et l'autre transversale avec un petit pourcentage des fissures obliques (figure 46).



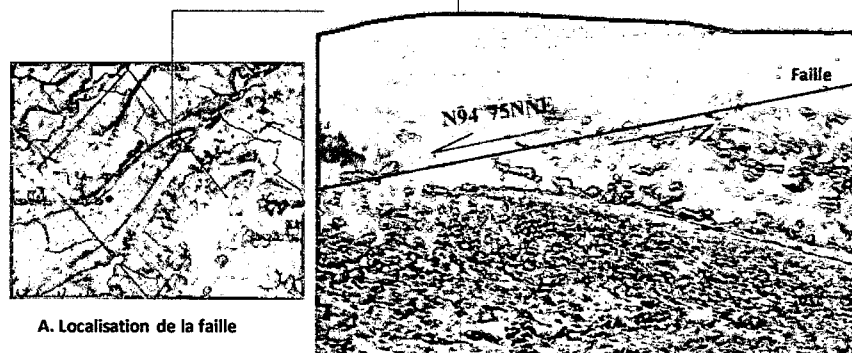
A. Situation de la zone de mesure de l'orientation des fissures



B. La rosace des fissures (Hireche Saad, mémoire de magister en cours, Université de Jijel)

Figure 46 : Rosace des fissures dans le flanc SE du synclinal de Gourrigueur

- les failles : on observe sur le flanc SE du synclinal de Gourrigueur, sur la carte géologique (figure 21), des failles selon la direction WNW-ESE, presque orthogonale sur l'axe du pli. On observe aussi sur flanc SE des failles (figure ci-dessous). Ces derniers produisent d'autres fissures supplémentaires qui vont modifier la fissuration produites par le plissement et créent des axes de drainage suivant leur direction. Plusieurs sources émergent sur le flanc de ce pli.



A. Localisation de la faille

B. Photo de la faille (Hireche Saad, mémoire de magister en cours, Université de Jijel)

Figure 47 : Décrochement sénestre dans le flanc Sud Est du synclinal Gourrigueur.

En se basant sur les données tectoniques citées ci-dessus, on peut proposer les modèles conceptuels ci-dessous pour le fonctionnement hydrodynamique :

- Cas de l'existence seulement des fissures liées au plissement : les eaux souterraines suivront la direction des fissures. L'eau s'infiltrera verticalement, puis suivra la direction de la fissuration selon la différence de charge. Dans le cas où l'eau atteindra le substratum, il suivra la pente de ce dernier et la différence de charge (figure 48). Ce modèle s'applique aux zones plissées où la fissuration est liée seulement à ce dernier.

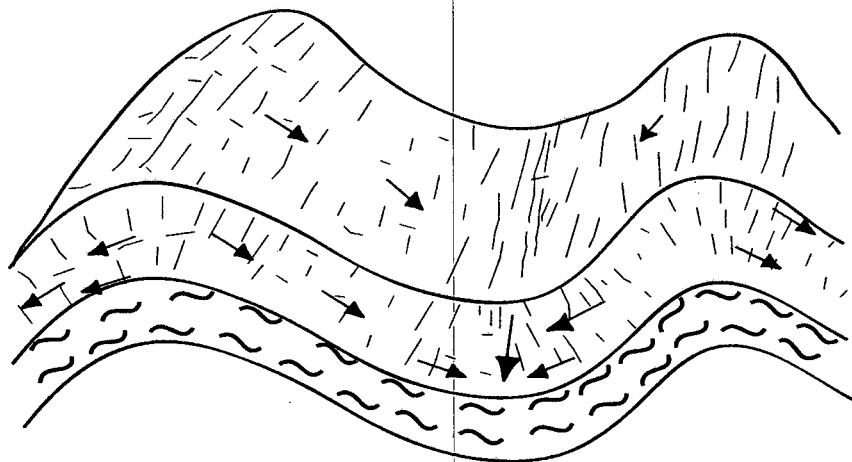


Figure 48 : Modèle conceptuel pour le fonctionnement hydrodynamique dans des calcaires plissés et fissurés (axiale et transversale)

L'écoulement des eaux se fait du flanc vers l'axe du pli, puis il aura une accumulation des eaux pour constituer un axe de drainage suivant la direction et la pente de l'axe du pli.

- Cas de l'existence seulement de la fissuration liée aux failles. Dans ce cas l'écoulement se fait selon la direction de faille et la différence de charge.
- Cas de l'existence de la fissuration liée au plissement et à la faille. Dans ce cas l'écoulement suit la direction des fissures et du plissement (du flanc vers l'axe) et dans le cas où il rencontrera une faille, il changera la direction en fonction de cette dernière et de la différence de charge. Dans ce cas on aura deux types d'axe de drainage :
 - Le premier est présenté par l'axe de synclinal qui draine les eaux du synclinal
 - Le deuxième est la faille qui draine les fissures qui se sont connectés.

Pour connaître la différence de charge sur la zone d'étude nous avons fait un profil hydrogéologique selon la direction WNW-ESE (Figure 49) et passant par les piézomètres non influencés par le pompage, à l'exception du forage L5 faute d'absence de piézomètre dans l'anticlinal de Meskiana. L'évolution hydrodynamique dans ces points d'eau est présentée dans la figure ci-dessous (Figure 50) :



----- Coupe hydrogéologique

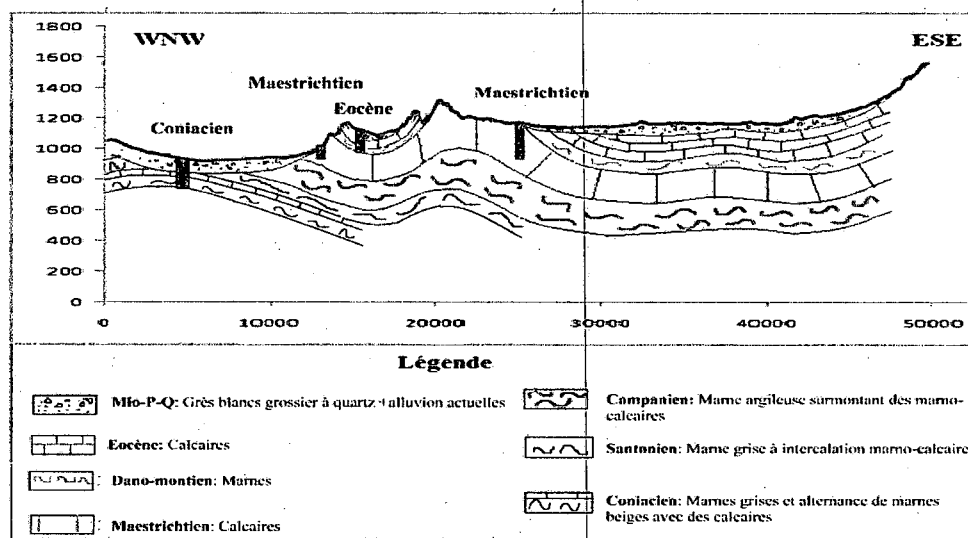


Figure 49 : Coupe hydrogéologique.

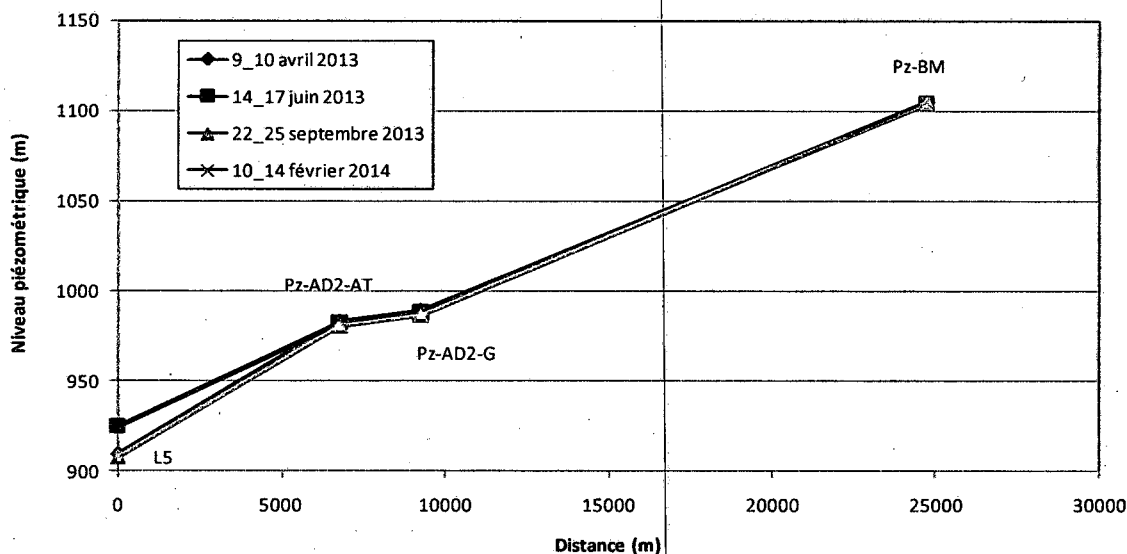


Figure 50 : Evolution spatio-temporelle du niveau piézométrique dans les points d'eau de la coupe hydrogéologique qui traversent la zone d'étude selon la direction WNW-ESE

Cette figure montre que l'écoulement des eaux souterraines en suivant seulement la différence de charge se fait de l'ESE vers le WNW. L'évolution temporelle montre que cette direction est stable dans le temps et que seulement le forage L5 qui montre des fluctuations importante, cela est dû à l'effet de pompage.

IV.2.3. Fonctionnement hydrodynamique au niveau local

Pour connaître l'écoulement des eaux souterraines au niveau local, nous avons sélectionné trois zones (figure 51) :

- La zone numéro 1 : se localise au Nord Ouest de la ville de Bir-Mokadam et elle se trouve au milieu du synclinal amont de Chéria. Dans cette zone on a choisi les piézomètres et les forages suivants : Pz-BM, Pz-F2, D1, F2 ;
- La zone numéro 2 : se trouve dans la région de Gourrigueur. Les points d'eau (Pz-AD2-T, Pz-AD2-G, AD1-G, AD2-G et S-RD) se trouvent sur le flanc NW du synclinal ;
- La zone numéro 3 : se situe entre Ain Dalaa et Meskiana, elle représente le cœur de l'anticlinal érodée de Meskiana. Les points d'eau qui ont été suivis sont : L5 ; G4-6, F7, F8 et Pz-M.



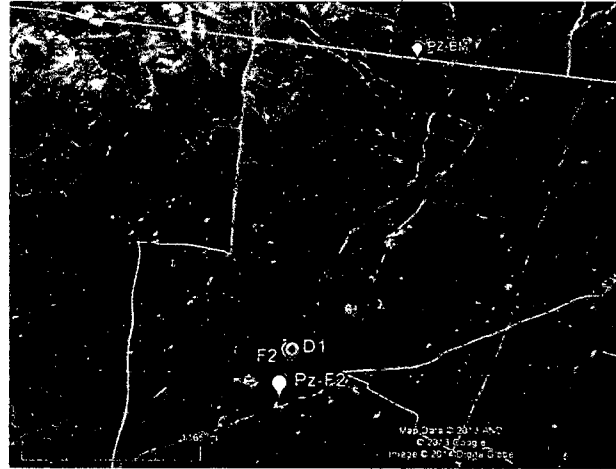
Figure 51 : Localisation des zones locales sur la zone d'étude

IV.2.3. 1. Synclinal de Chéria (zone de Bir Mokadam)

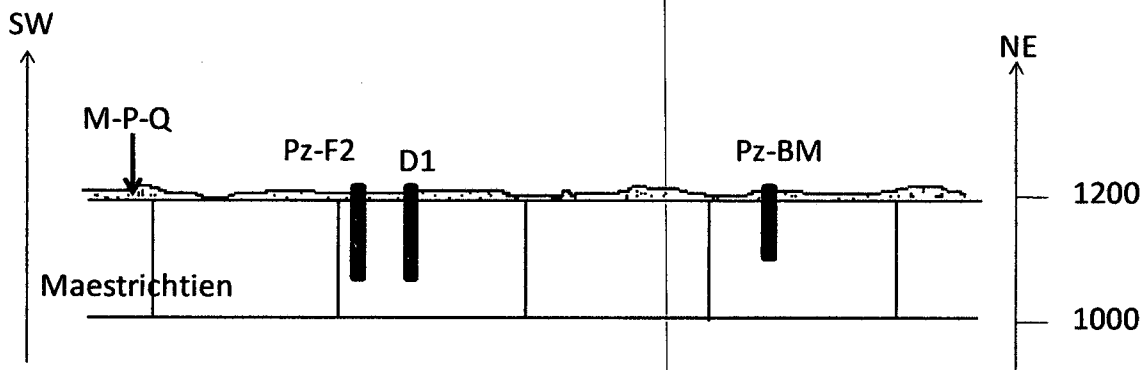
Cette zone représente le flanc (NW) du grand synclinal de Chéria. Trois points d'eaux ont été choisis pour étudier le fonctionnement hydrodynamique de la nappe dans cette zone (figure 52) :

- deux piézomètres (Pz-BM et Pz-F2) : le piézomètre Pz-F2 se situe près du forage D1 (environ 270 m) et le Pz-BM situé loin du forage D1 (environ 3.6 Km) ;

- et deux forages en exploitation (F2 et D1). Ils s'éloignent d'un à l'autre d'une distance de 30 m. Le forage F2 est le plus exploité avec un débit d'environ 60 l/s, mais on n'a pas pu accéder aux mesures du niveau piézométrique. Ces derniers ont été faits au niveau du forage D1.



A : Vue satellitaire du flanc NW du synclinal de Chéria (zone de Bir Mokadam)



B) Coupe hydrogéologique sur le flanc NW du synclinal de Chéria (région de Bir Mokadam)

Nom	X (m)	Y (m)	Profondeur du forage (m)	Formation géologique captée	Débit (L/s)	Profondeur de la crépine (m)	Epaisseur alluvion (m)
Pz-F2	956.831	241.378		Calcaire de Maestrichtien			
F2	956.843	241.636	150	Calcaire de Maestrichtien	60	70	
D1	956.880	241.637	150	Calcaire de Maestrichtien		60	
Pz-BM	957.470	245.207	120	Calcaire de Maestrichtien			30

c) Caractéristiques des forages (région de Bir Mokadam)

Figure 52 : Position et caractéristiques des points d'eau sur le flanc NW du synclinal de Chéria (région de Bir Mokadam)

L'évolution spatio-temporelle du niveau piézométrique dans ces points d'eau est présentée dans le graphe ci-dessous :

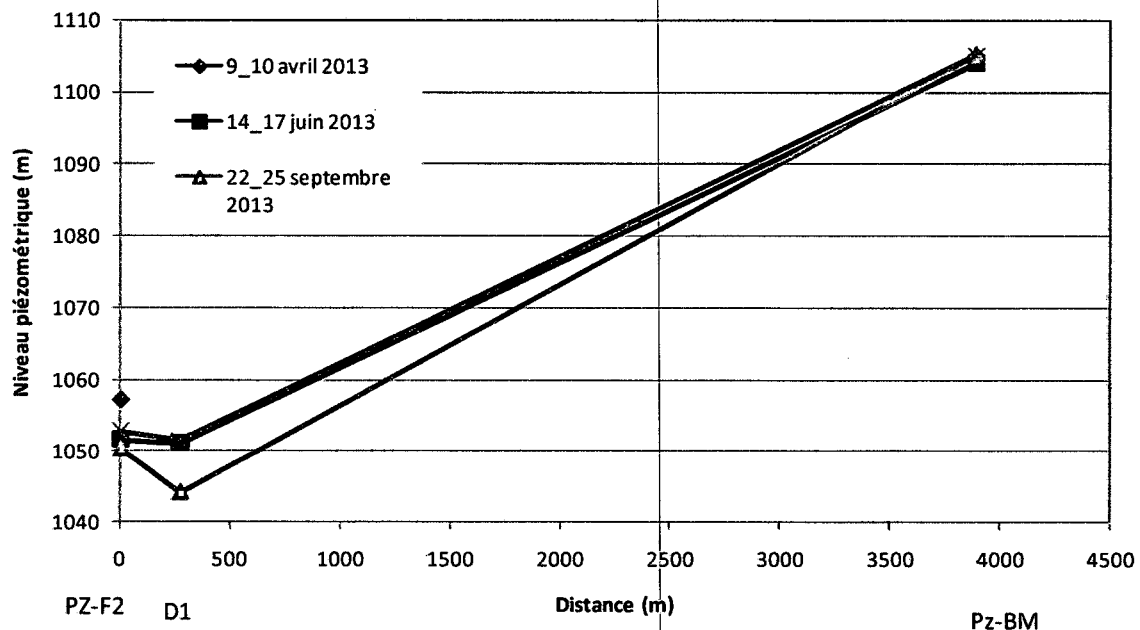


Figure 53 : Evolution spatio-temporelle du niveau piézométrique durant les mois d'Avril Juin, Septembre 2013 et Février 2014

Ce graphe montre deux zones distinctes :

- une zone caractérisée par un niveau piézométrique très élevé (1105,17 m), indiquant l'état de la nappe sans l'effet du pompage. La différence de charge de cette zone par rapport à la deuxième zone est d'environ 53 m, indiquant que le pompage dans le forage (F2) n'a pas influencé le piézomètre Pz-BM, cela peut être expliqué par le fait que la zone 1 et la zone 2 n'appartiennent pas au même réseau de fissures ou que la zone 1 et la zone 2 sont connectées par des fissures fines qui n'influencent pas la dynamique de l'aquifère.
- la deuxième est caractérisée par un niveau très bas (1044,1 - 1052,77 m), cela est dû à l'effet du pompage intensif au niveau du forage (F2) (5184 m³/j).

On remarque aussi que le piézomètre Pz-F2 s'est baissé presque au même niveau que celui du forage D1, cela indique que les deux points d'eau sont connectés par une fissure importante qui permet une bonne circulation d'eau entre le forage et le piézomètre.

En se basant sur les données hydrodynamiques précédentes ; on peut redessiner le graphe précédent comme suit (figure 54) :

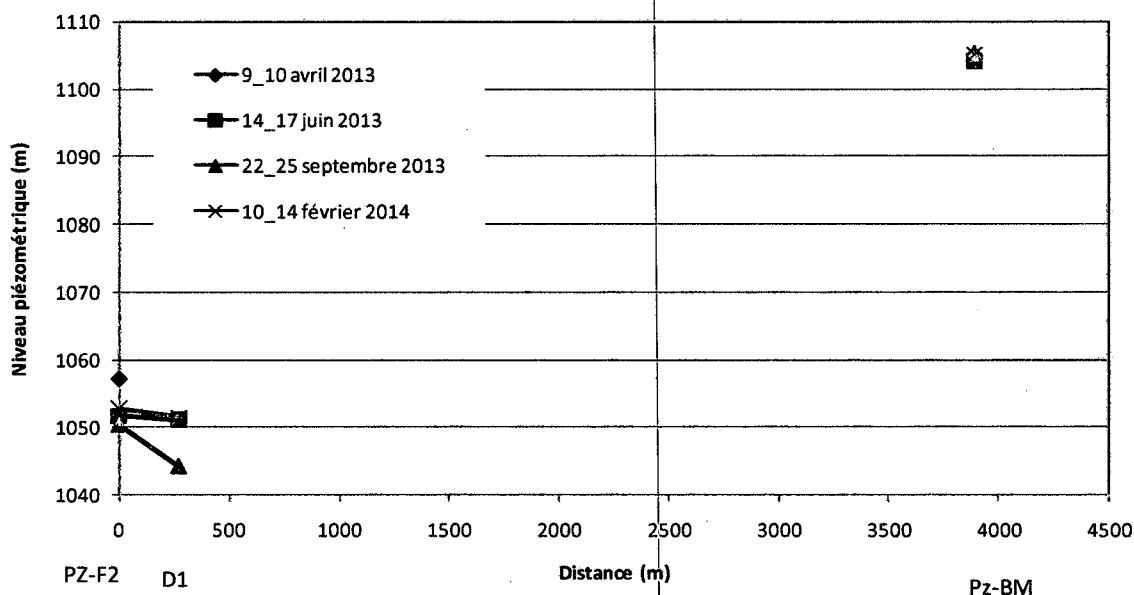


Figure 54 : Evolution spatio-temporelle du niveau piézométrique durant les mois d'Avril, Juin, Septembre 2013 et Février 2014

Le schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique dans le flanc NW du synclinal de Chéria (zone de Bir-Mokadam) peut être donné comme suit :

- le modèle 1 : se base sur la direction du pendage des couches sans prendre en compte la fissuration. Comme on a un synclinal ; donc il y a deux directions d'écoulement des eaux souterraines selon les flancs : une de l'ESE vers l'WNW dans le flanc SE et une de l'WNW vers l'ESE dans le flanc NW, puis les deux écoulements s'accumulent au centre du synclinal et forment un axe de drainage de l'amont vers l'aval (NE-SW),
- le deuxième modèle se base sur l'écoulement dans la fissuration. Ce dernier a été détecté en fonction des réponses hydrodynamiques entre le forage D1 et le piézomètre PzF2.

Le couplage entre les deux approches, nous a permis de dessiner ce modèle conceptuel de l'écoulement dans la région de Bir-Mokadam (Figure 55).

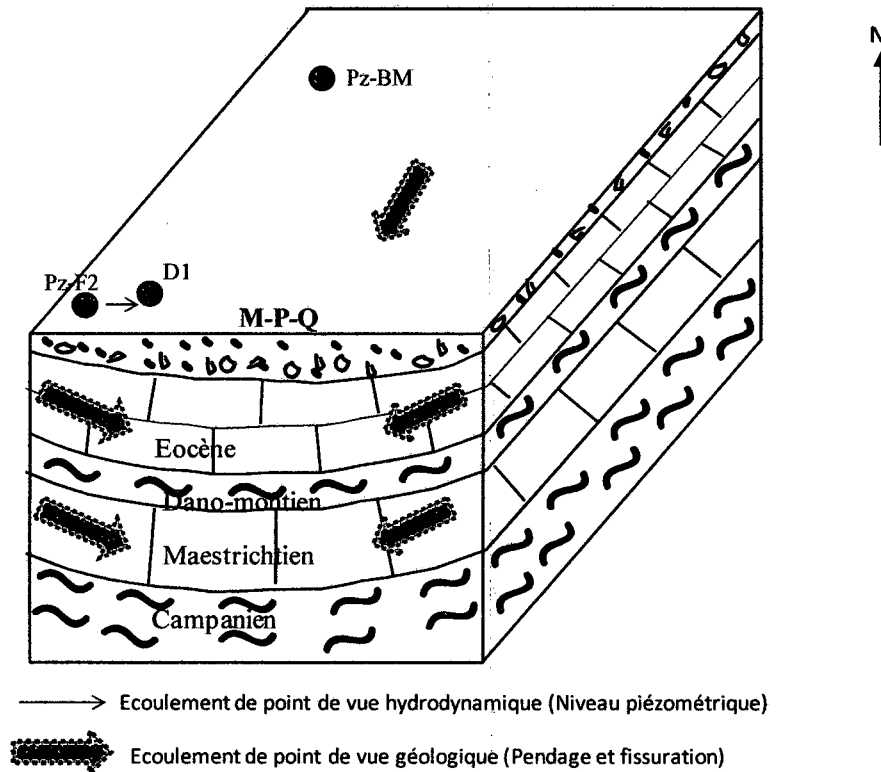


Figure 55 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique dans le flanc de Bir-Mokadam et le synclinal de Chéria (période d'Avril, Juin ; septembre 2013 et Février 2014)

IV.2.3.2. Synclinal de Gourrigueur (ex. Ain Dalaa)

Pour étudier le fonctionnement hydrodynamique de ce synclinal (Figures 56 et 57) nous avons choisi :

- trois forages en exploitation (AD1-G, AD2-G et AD2-T) : dans ces forages nous n'avons pas pu faire les mesures hydrodynamiques, vu que les forages ont été fermé. Une mesure a été faite dans un piézomètre au voisinage (5 m du forage) a montré que le niveau piézométrique se trouve à une profondeur supérieure à 100 m (la longueur maximale de notre sonde), cas du forage AD2-G où on a mesuré une profondeur de 100 m sans atteindre le niveau de l'eau.
- deux piézomètres (Pz-AD2-G et PZ-AD2-T), pour connaître l'état naturel de la nappe et l'effet des forages sur l'évolution de son niveau, cas du piézomètre PZ-AD2-T situé à une distance de 410 m du forage AD2-T ;
- et la source (S-RD)

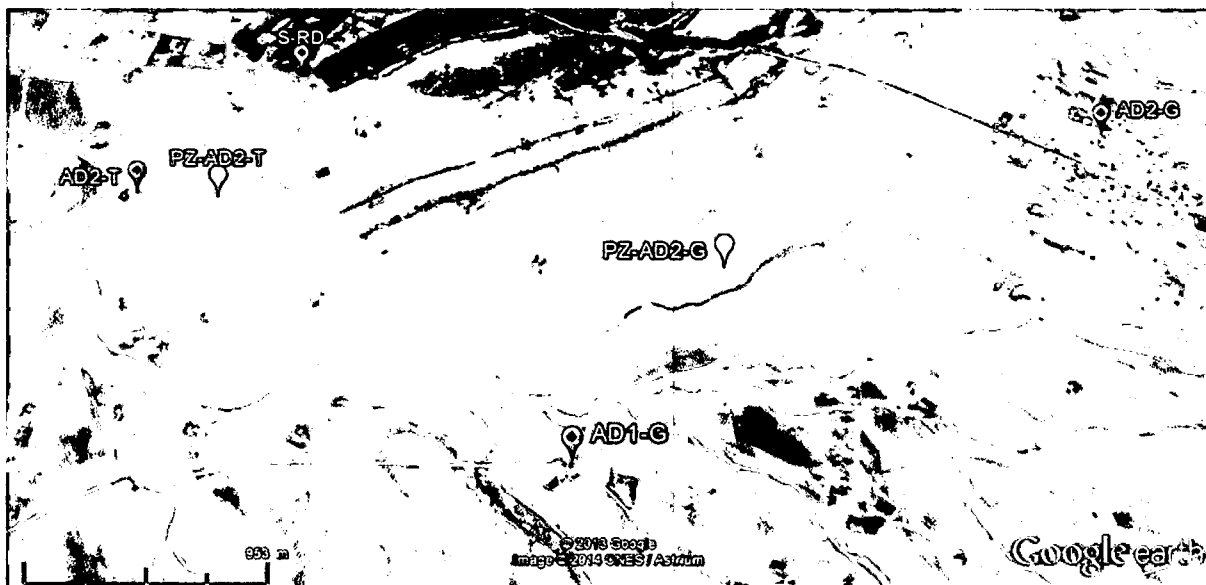


Figure 56 : Vu satellitaire du flanc NW du synclinal Ain Dalaa

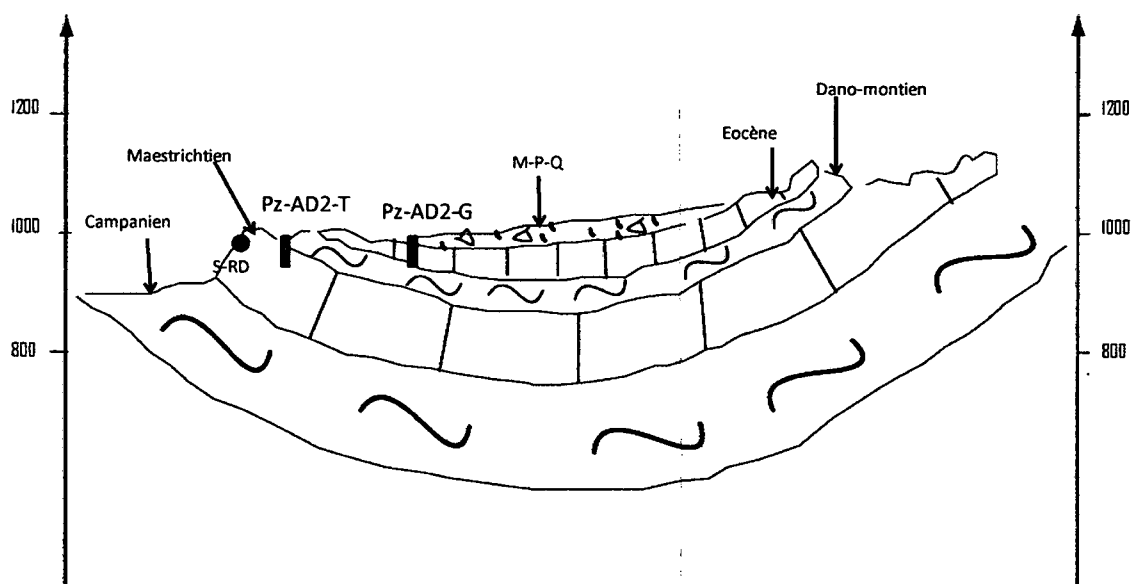


Figure 57 : Coupe transversale du synclinal de Gourrigueur (ex Ain Dalaa)

IV.2.3.2.1. Fonctionnement hydrodynamique entres les piézomètres Pz-AD2-G et Pz-AD2-T

L'évolution spatiotemporelle du niveau piézométrique entre le piézomètre Pz-AD1-G et le piézomètre Pz-AD2-T est présentée dans le graphe suivant (Figure 58) :

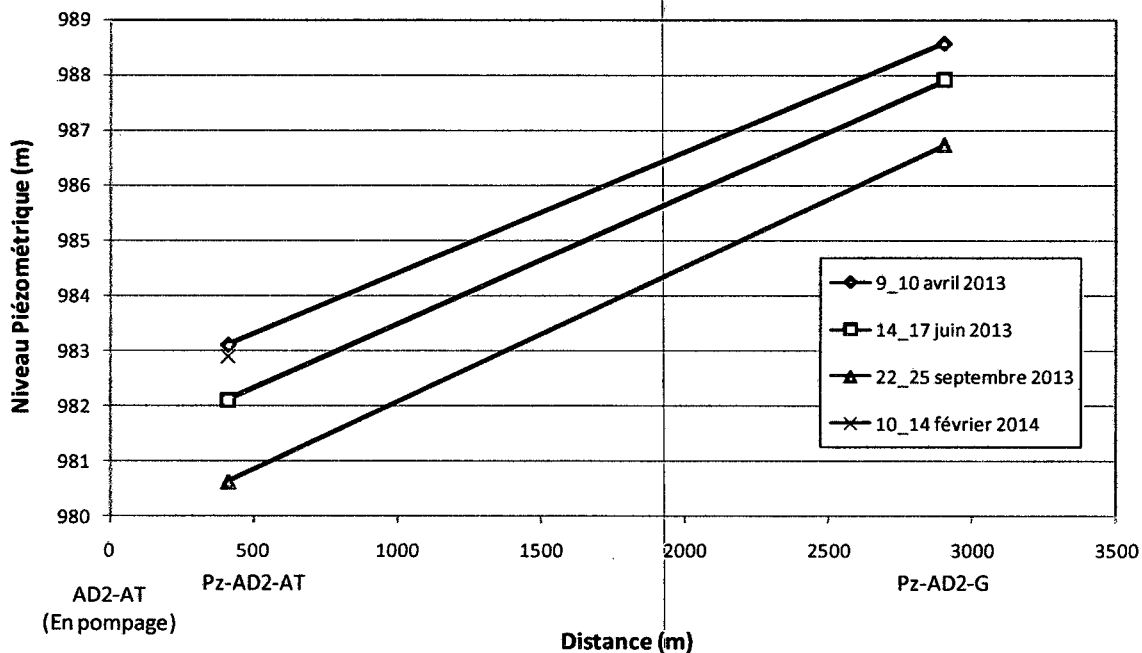


Figure 58 : Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace (Avril, Juin, Septembre 2013 et février 2014)

Ce graphe montre que le niveau piézométrique est en abaissement pour les périodes de Juin et Septembre ce qui peut être expliquée par un manque de précipitation. La comparaison entre la charge d'eau entre les deux piézomètres montre qu'elle est élevée dans le piézomètre Pz-AD2-G par rapport au piézomètre Pz-AD2-AT, une différence de charge entre eux d'environ 6 m. Ce qui indique que si les deux piézomètres sont connectés, l'écoulement des eaux se fait du piézomètre Pz-AD2-G au piézomètre Pz-AD2-T.

L'évolution temporelle du niveau piézométrique dans les deux forages montre qu'elle est régulière et comparable dans les deux piézomètres et la direction d'écoulement est la même pendant les trois campagnes (Avril, Juin et Septembre 2013), cela nous laisse supposer qu'il y a une relation hydrodynamique entre ces points d'eau ou qu'ils appartiennent au même aquifère.

Le modèle conceptuel de fonctionnement hydrodynamique est présenté dans la figure suivante (figure 59) :

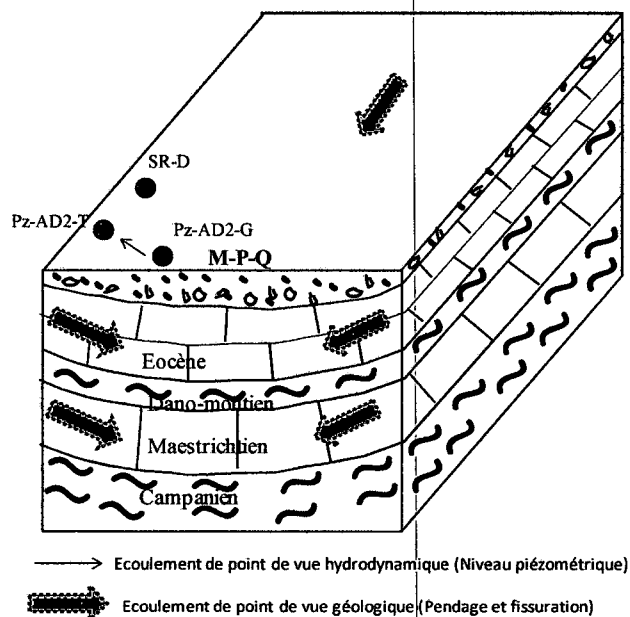


Figure 59 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique du synclinal de Gourrigueur (ex Ain Dalaa)

Ce modèle montre que la direction d'écoulement obtenue à partir de l'hydrodynamique est inverse à celle obtenue de point de vue géologique, cela implique que dans cette zone il y a la possibilité de l'existence d'une faille transversale qui fait changer la direction de l'écoulement.

IV.2.3.2.1. Fonctionnement hydrodynamique de la source de Ain-Dalaa

La source d'Ain Dalaa (photo 9) a été déjà étudiée par Durozoy (1952).



Photo 9 : Source d'Ain Dalaa photo extraite de Google Earth 2014.

La carte géologique et tectonique (figure 60) réalisée au voisinage de la source montre l'existence d'une faille à la proximité de la source, ce qui implique une possibilité de connexion entre les deux.

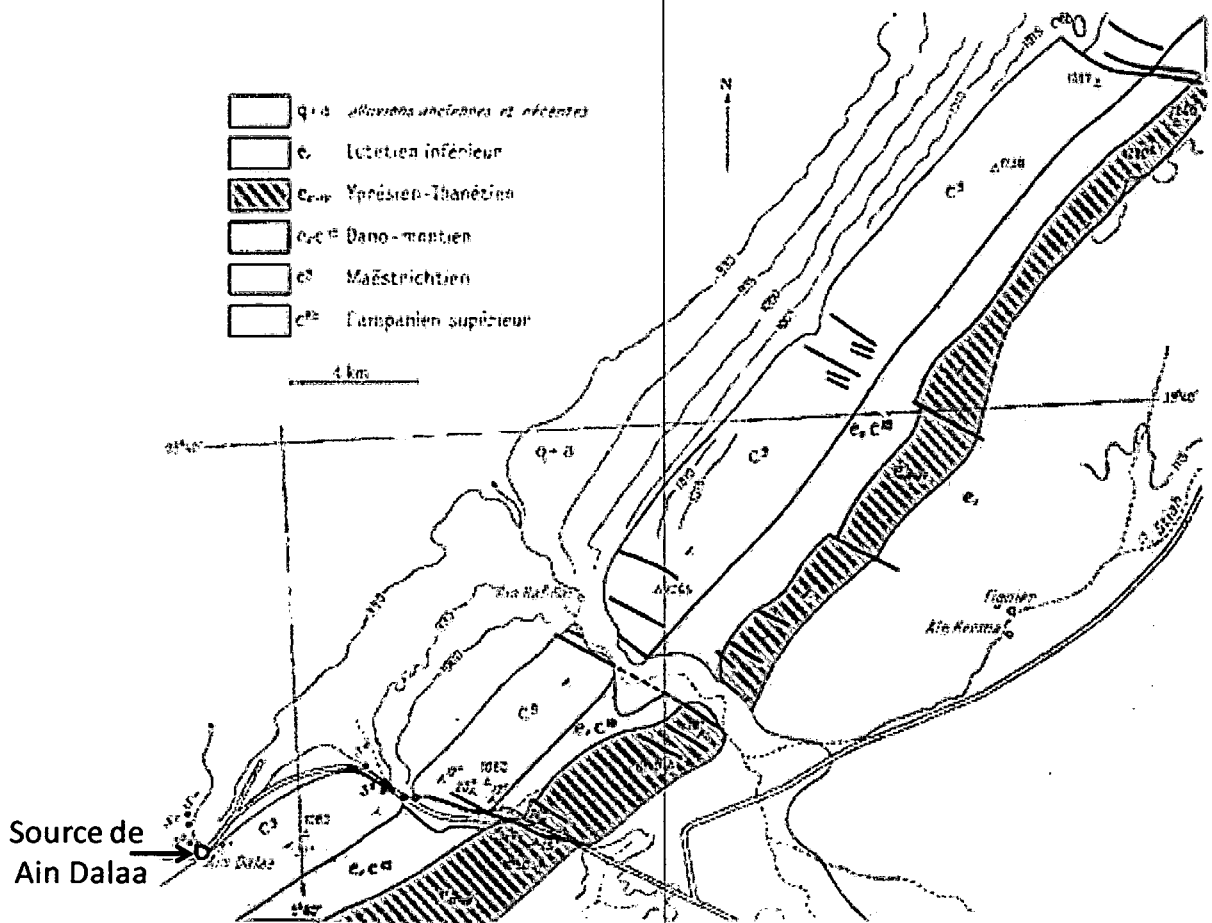


Figure 60 : Cadre géologique de la bordure Ouest du synclinal de l'Ain Dalaa (Durozoy, 1952)

Pour bien montrer la relation entre la faille et la source d'Ain Dalaa, plusieurs sondages ont été réalisés au voisinage de la source. Les logs stratigraphiques des deux sondages les plus proches de la source sont présentés dans la figure 62.

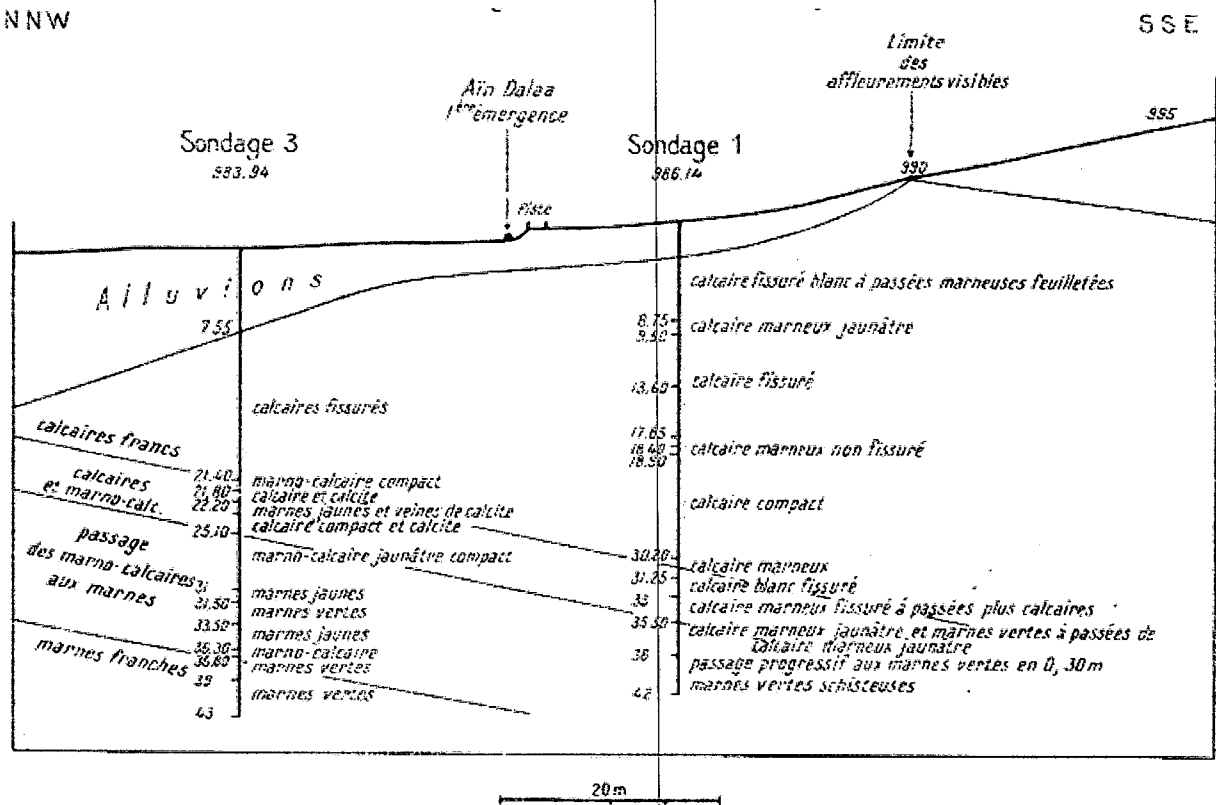


Figure 61 : Coupe géologique montre la base du Maestrichtien (Durozoy 1952)

La corrélation entre les deux sondages montre qu'il n'y a pas d'extension de la faille jusqu'à la source, mais on observe un calcaires très fissurés dans les premiers 15 m. Ce qui peut indiquer qu'il y a une connexion par fissures entre la faille et la source. La question qu'on a posé après, pourquoi l'émergence de cette source a été faite exactement en cet endroit ? La réponse à cette question on la trouve dans les courbes de niveau, la source se trouve dans le niveau le plus bas 990 m (figure 61), cela explique le déplacement de l'eau de la charge la plus élevée vers la charge la plus basse.

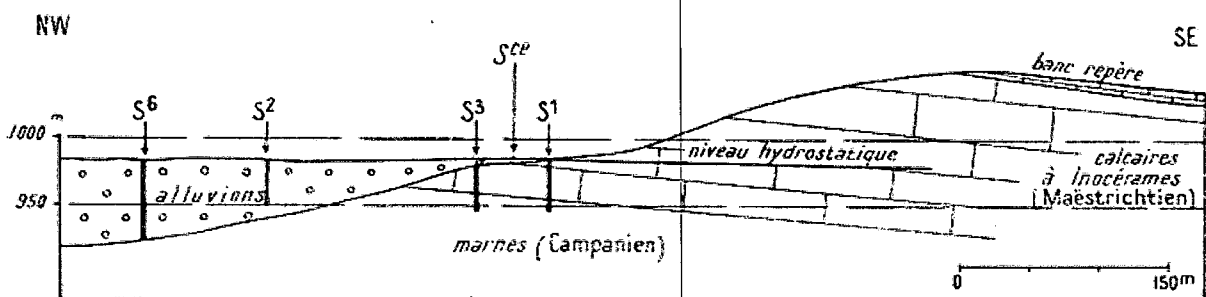


Figure 62 : Coupe géologique passant par la Source de l'Ain Dalaa (G. Durozoy 1952)

L'étude de la relation pluie – débit de la source de Ain Dalaa par Durozoy (Figure 63) montre que :

- le débit de base pour la source de l'Ain Dalaa est d'environ 74 l/s (Durozoy 1952), indiquant l'origine souterraine des eaux de la source ;
- Le débit de la source évolue proportionnellement à la hauteur de précipitation, indiquant la connexion de son réservoir hydrogéologique avec les eaux de pluie et le renouvellement de ses eaux. Une précipitation mensuelle d'environ 100 mm a produit une augmentation du débit d'environ 30 l/s, ce qui implique une augmentation de 3 l/s pour chaque 10 mm/mois.

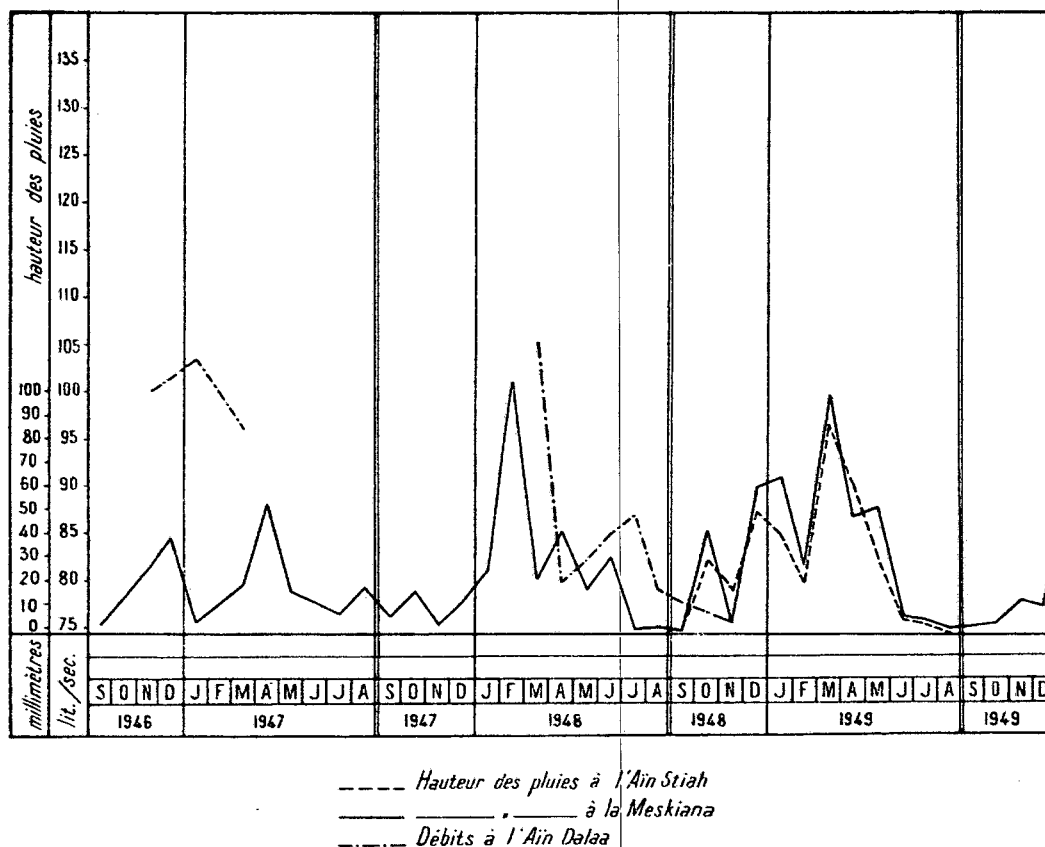
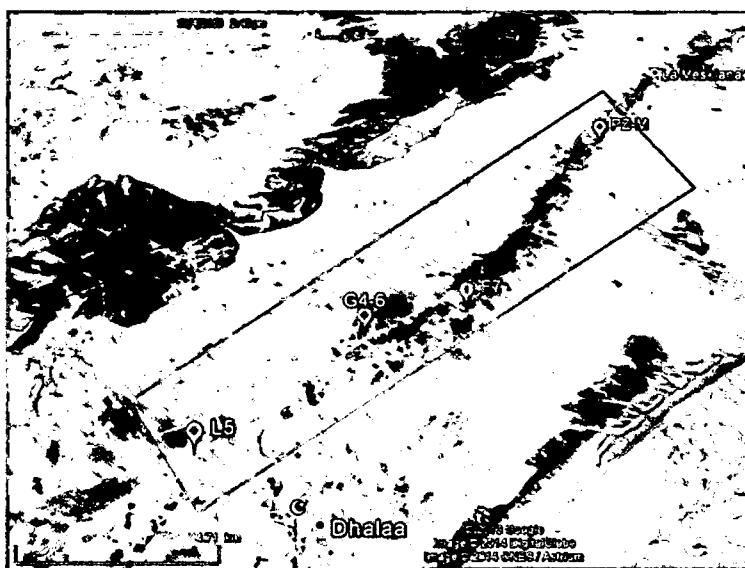


Figure 63 : Evolution du débit de la source d'Ain Dalaa en fonction des précipitations (Durozoy 1952)

IV.2.3.3. Bassin de Meskiana

Les points d'eau inventoriés, dans cette zone, se localisent sur les deux rives de l'oued Guergoub El-Melah, qui traverse le centre du bassin de Meskiana et le cœur de l'anticlinal érodé de Meskiana. Ces points d'eau sont représentés par trois forages peu profonds et un piézomètre qui captent les formations calcaires du Turonien (figure 64).



a) Vue satellitaire de l'anticlinal de Meskiana (Google Earth Février 2014)

Nom	X (Km)	Y (Km)	Profondeur du forage (m)	Formation géologique captée	Débit (L/s)	Profondeur de la crépine (m)	Epaisseur des alluvions (m)
L5	936.329	253.003	125	Calcaire Turonien	5		
G4-6	940.035	257.240	105	Calcaire Turonien	12		
F7	942.871	258.418					
Pz-M	947.036	266.867	130		15		8

b) caractéristiques de points d'eau

Figure 64 : Position et caractéristiques des points d'eau dans le bassin de Meskiana

L'évolution spatiotemporelle du niveau piézométrique est présentée dans la (figure 65). L'examen de l'évolution spatiale, montre que l'écoulement principal des eaux souterraines, pendant toutes les campagnes, se fait selon la direction SW-NE. L'analyse temporelle montre que le niveau piézométrique dans le forage L5 présente une baisse importante durant le mois d'avril et septembre, cela revient à l'effet du pompage.

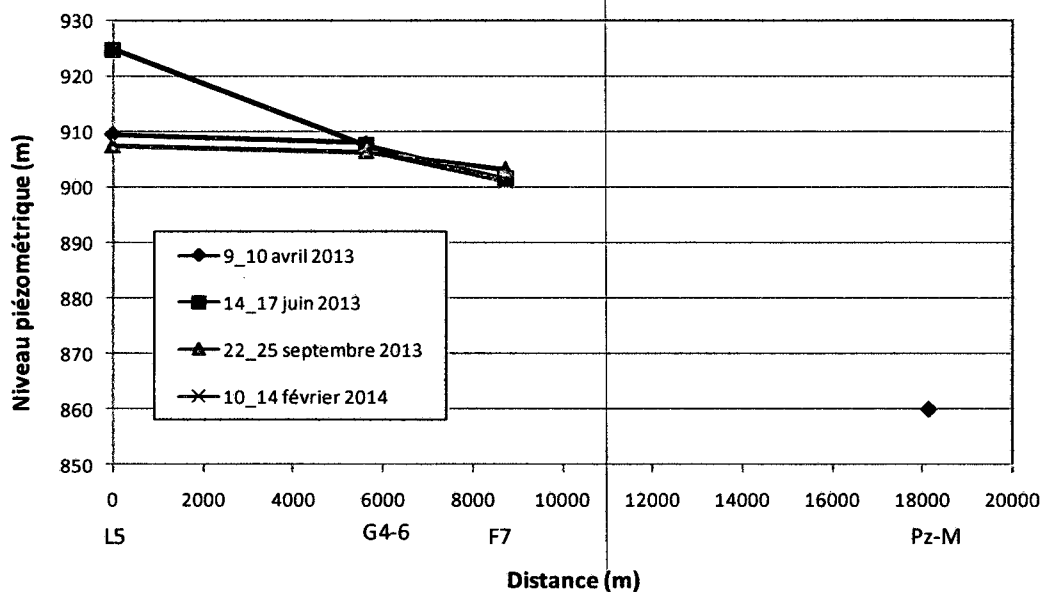


Figure 65 : Evolution de la profondeur du plan d'eau dans le temps et dans l'espace (Avril, Juin, Septembre 2013 et Février 2014)

Le modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique dans les formations du Turonien est présenté par la figure ci-dessous :

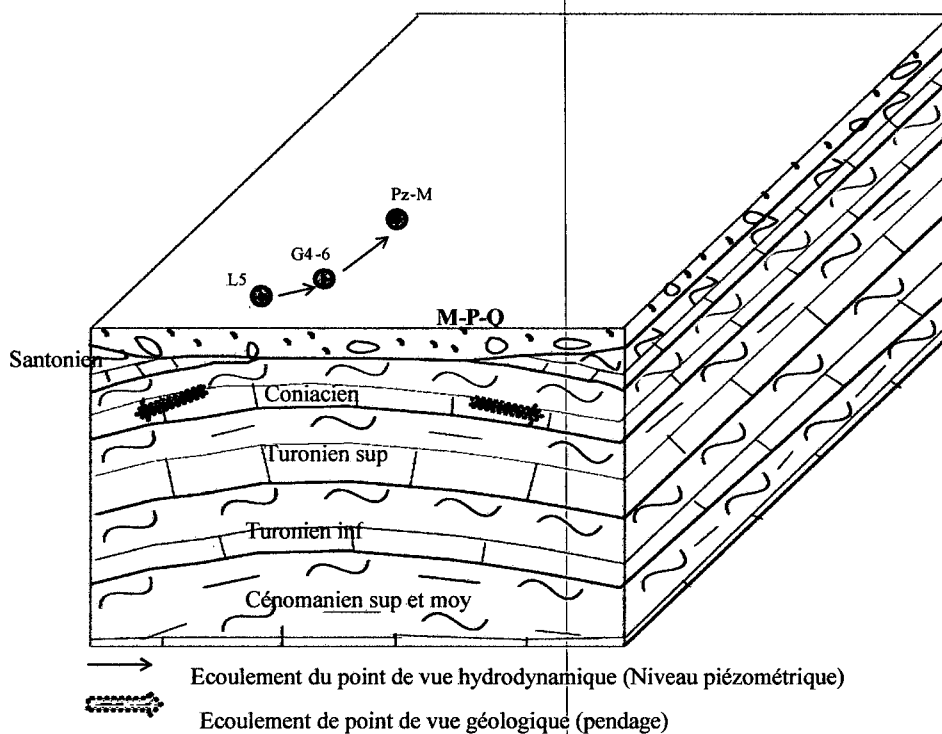


Figure 66 : Modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique dans les formations calcaires du Turonien (bassin de Meskiana)

IV.2.4. Conclusion

Cette étude montre que le synclinal de Gourrigueur présente deux types de fissures : axiales et transversales, indiquant que la fissuration suit le modèle général des fissures dans les synclinaux. Ces fissures représentent les chemins préférentiels pour la circulation des eaux souterraines.

Les modèles conceptuels qu'on a établis pour la zone d'étude montrent que les eaux souterraines coulent du flanc vers le centre du synclinal sous l'effet de la différence de charge entre les points d'eau connectés par des fissures. Puis l'eau suivra l'inclinaison de l'axe du synclinal. L'existence des failles dans le synclinal perturbera ce modèle d'écoulement et créera d'autres chemins préférentiels à l'écoulement principal des eaux.

IV.3. Etude hydrochimique

IV.3.1. Introduction

L'étude hydrochimique est très intéressante pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des aquifères, elle permet à partir de la signature chimique de déterminer l'origine, les formations géologiques traversées et le type de circulation des eaux (lente, rapide...). Pour cela cette étude a été menée, dans les buts sont :

- Valider les hypothèses du fonctionnement hydrodynamique proposées dans la partie hydrodynamique ;
- Déterminer d'autres chemins de la circulation des eaux souterraines.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons programmé un suivi trimestriel de la chimie des eaux des forages sur une année (avril 2013 à février 2014), dont le but est de connaître l'évolution temporelle de la chimie des eaux souterraines.

IV.3.2. Localisation des points d'eau

Huit forages en exploitation existent dans la zone d'étude (F2, D1, AD1-G, AD2-G, AD2-T, L5, G4-6, et F7) et la source d'Ain Dalaa (Ras-Dalaa) (S-RD). Nous avons eu accès seulement aux prélèvements d'eau, mais pas à la piézométrie, faute d'absence d'accès au forage.

La répartition spatiale des forages et de la source est présentée dans la figure ci-dessous :



Figure 67 : Situation géographique des points d'eau de prélèvement

IV.3.3. Analyse statistique des données hydrochimiques

L'étude statistique des données est primordiale pour connaître les relations existantes entre les variables et les individus ainsi que leur évolution spatiale et temporelle. Pour atteindre ces objectifs, nous avons opté pour deux études :

- La première est préliminaire, elle concerne l'étude statistique élémentaire des variables ;

- La deuxième est plus avancée, c'est l'Analyse en Composantes Principales (ACP), elle traite les relations existantes entre les variables et les individus ainsi que leur évolution spatio-temporelle.

IV.3.3.1. Analyse élémentaire

L'analyse statistique élémentaire des données est présentée dans le tableau 9 :

	N Actifs	Moyenne	Minimum	Maximum	Etendue	Ec.-Type
Cond (25°C)	30	916.20	412.00	2750.00	2338.00	598.66
Sal	30	0.39	0.10	1.40	1.30	0.33
T°C	22	17.27	11.17	21.20	10.03	2.25
pH	22	8.05	7.57	10.33	2.76	0.62
O ₂	22	5.56	1.74	21.40	19.66	4.85
Ca ²⁺	29	68.48	25.60	137.88	112.28	28.63
Mg ²⁺	28	9.38	0.12	100.00	99.88	18.23
Na+K	28	958.72	234.93	2528.39	2293.46	648.07
SO ₄ ²⁻	29	422.86	149.00	742.00	593.00	178.94
HCO ₃ ⁻	29	186.14	78.08	261.08	183.00	38.27
Cl ⁻	29	1174.47	248.50	3443.50	3195.00	949.10

Tableau 9 : Statistique élémentaire

Ce tableau montre que :

- la conductivité moyenne des eaux est de $916 \mu S/cm$, mais elle présente un écart important entre les différentes valeurs avec un écart type de $598 \mu S/cm$ et une étendue (maximum – minimum) de $2338 \mu S/cm$;
- la température des eaux est principalement faible ($< 20^\circ C$), en moyen $17.27^\circ C$, cela revient au fait que les forages captent des aquifères profonds, où les eaux ne sont pas très influencées par les changements climatiques. L'écart type de la température est de $2.25^\circ C$ et l'étendu est de $10^\circ C$.
- le pH est basique dans toutes les eaux, indiquant un dégagement de CO_2 ou une combinaison de ce dernier avec Ca^{2+} pour former la calcite. L'intervalle de variations du pH est entre 7.5 et 10.3.
- les éléments chimiques présentent des concentrations variables, on peut les diviser en deux groupes :
 - groupe des faibles à moyennes concentrations : l'élément qui présente les concentrations les plus faible est le magnésium (Mg^{2+}) avec une moyenne de 9.38 mg/l , puis le calcium (Ca^{2+}) avec une moyenne de 68 mg/l , puis les bicarbonates (HCO_3^-) avec une concentration moyenne de 186 mg/l ;
 - groupe des fortes concentrations : il commence avec les sulfates (SO_4^{2-}) avec une moyenne de 422 mg/l , puis le sodium et le potassium ($Na^+ + K^+$) avec une concentration moyenne de 958 mg/l , et enfin le chlorure (Cl^-) avec une moyenne de 1174 mg/l .

L'établissement de la matrice de corrélation entre les 11 variables et sur la base des 21 individus est présenté dans le tableau ci-dessous :

	Cond (25°C)	Sal	T°C	pH	O ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na+K	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
Cond (25°C)	1.00	1.00	-0.37	0.07	-0.28	0.93	-0.19	0.34	0.27	0.12	0.36
Sal		1.00	-0.38	0.08	-0.28	0.93	-0.21	0.35	0.29	0.13	0.37
T°C			1.00	-0.78	0.32	-0.48	0.51	-0.45	-0.32	-0.54	-0.43
pH				1.00	-0.11	0.22	-0.36	0.28	0.09	0.45	0.27
O ₂					1.00	-0.47	0.59	-0.44	0.09	-0.50	-0.47
Ca ²⁺						1.00	-0.48	0.48	0.15	0.37	0.51
Mg ²⁺							1.00	-0.60	0.14	-0.75	-0.62
Na+K								1.00	0.31	0.76	0.99
SO ₄ ²⁻									1.00	-0.02	0.22
HCO ₃ ⁻										1.00	0.77
Cl ⁻											1.00

Tableau 10 : Matrice de corrélations

Pour connaître les relations significatives, nous avons utilisé la formule de Mangin 1975 pour déterminer le seuil des bonnes corrélations R :

$$R^2 = \frac{2}{\sqrt{n-3}}$$

Après calcul, nous avons obtenu $R = 0.68$, cela implique que toutes les corrélations supérieures à 0.68 sont des bonnes relations. Elles sont représentées en gras dans la table de corrélations.

Cette matrice montre :

- une bonne relation entre Na⁺ et Cl⁻, indiquant que l'origine de ces deux éléments chimiques est l'halite (NaCl) ;
- une bonne relation entre HCO₃⁻ et Na⁺+K⁺ et une relation inverse entre HCO₃⁻ et Mg²⁺, indiquant la possibilité que l'eau traverse les deux formations géologiques (halite et les carbonatées) ;
- une bonne corrélation de Ca²⁺ avec la salinité et la conductivité.
- une relation inverse entre le pH et la température.

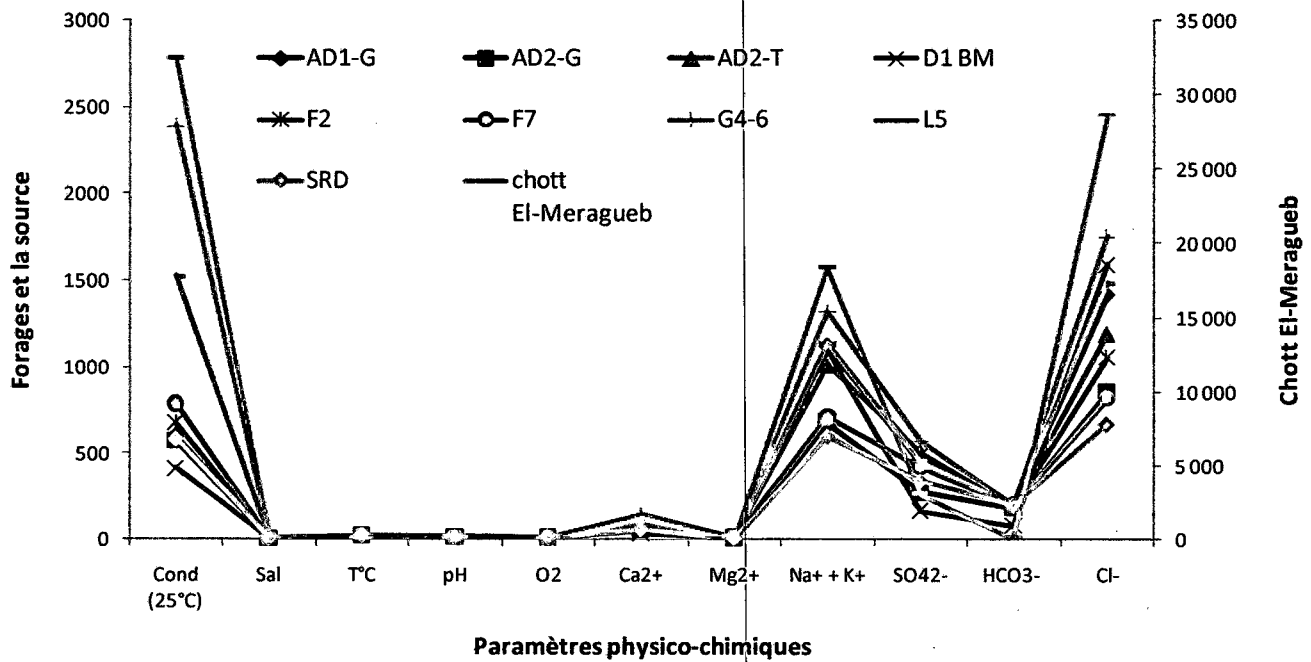
Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques de chaque forage ainsi que la source et le chott sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Nom	Unité	AD1-G	AD2-G	AD2-T	D1 BM	F2	F7	G4-6	L5	chott El-Meragueb	SRD	Norme de potabilité algérienne*
Cond (25°C)	µS/cm	597	572	582	412	674	783	2 390,0	1 523,8	32 500,0	583	2800 (à 20°C)
Sal		0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	1,2	0,7	19,8	0,2	
T°C	°C	17,5	18,2	17,0		17,1	16,7	14,8	17,7	10,5	18,7	
pH		8,0	7,9	7,9		8,2	8,6	8,3	7,7	9,5	7,8	6,5 - 9,5
O ₂		4,4	5,8	7,9		4,9	4,7	2,7	4,0	3,3	9,2	
Ca ²⁺		53,3	56,1	49,5	25,6	62,5	66,0	130,1	98,4	1 362,7	52,9	
Mg ²⁺		7,5	4,3	9,4	5,8	2,3	9,2	5,2	4,6	56,7	4,8	150
Na ⁺ + K ⁺	mg/l	1 121,3	677,7	1 011,2	1 096,5	1 099,0	705,1	1 316,2	1 132,5	18 329,1	598,2	200 (sodium) 20 (potassium)
SO ₄ ²⁻		433,8	271,0	505,0	161,0	485,0	415,7	563,7	448,5	2 970,0	336,8	200 - 400
HCO ₃ ⁻		186,3	179,7	192,2	78,1	176,5	191,9	192,8	201,3	54,9	194,6	
Cl ⁻		1 418,2	853,2	1 191,0	1 590,4	1 052,9	813,6	1 749,0	1 487,5	28 648,5	669,2	200 - 500

* Norme algérienne selon l'arrêté interministériel du 22 janvier 2006

Tableau 11 : valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques

La représentation graphique de ces valeurs moyennes est présentée dans la figure ci-dessous:



Cette figure montre les valeurs les plus élevées sont celle de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ et Cl^- et qui dépassent les normes de potabilité algérienne.

IV.3.3.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Cette analyse a été effectuée sur deux séries, vu qu'il y a un manque de données dans les individus et les variables :

- La première analyse a été effectuée sur le maximum des variables (11 variables), elle est présentée seulement par 21 individus : l'objectif de cette analyse est de bien voir la relation qui existe entre les variables ;
- La deuxième analyse a été effectuée sur le maximum des individus (28 individus), elle est présentée seulement par 7 variables : l'objectif de cette analyse est de bien voir l'évolution temporelle et spatiale des individus.

IV.3.3.2.1 Première ACP

IV.3.3.2.1.1 La Variance des axes

L'analyse de la variance des axes montre que les axes 1 et 2 présentent la majorité (environ 67%) de la variance globale. Pour cela dans notre analyse, nous avons fait la projection seulement sur les axes 1 et 2.

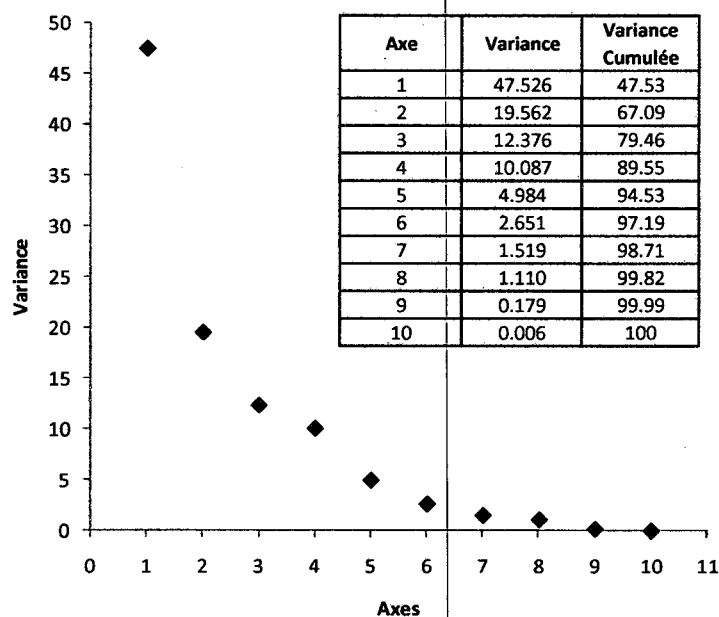


Figure 68 : Variance des axes (ACP 1)

IV.3.3.2.1.2 Projection des variables et des individus

La projection des 11 variables et des 21 individus, par l'analyse en composantes principales, sur les axes 1 et 2 est présentée dans la figure 69. On note que la campagne numéro 1 (avril 2013) n'a pas été analysée car on ne possède pas les données des paramètres physico-chimiques (T, pH et l'oxygène dissous).

La projection des variables montre que l'axe 1 présente la salinité avec deux pôles :

- Le premier proportionnel à la salinité : il est représenté par les corrélations proportionnelles entre Na^+ et Cl^- ; HCO_3^- et pH ; salinité, conductivité et Ca^{2+} . Indiquant que la salinité des eaux est liée à la fois à la dissolution de la Halite (NaCl), les formations carbonatées (CaCO_3) et les formations gypseuses (CaSO_4). Ces dernières (Ca^{2+} et SO_4^{2-}) présentent des faibles relations, cela peut être lié au fait que le calcium provient à la fois de la dissolution des calcaires et du gypse.

La projection des individus montre que cette salinité est liée principalement aux :

- forages L5 et G4-6 par Ca^{2+} et SO_4^{2-} ;
- et les forages AD1-G, AD2-T, F7, F2 et la source S-RD par Na^+ , Cl^- et HCO_3^- .

Ces forages présentent principalement la campagne de février 2014. Indiquant l'augmentation de la salinité pendant cette campagne.

- Le deuxième présente une proportion inverse à la salinité et est représenté par la température, l'oxygène dissous et le magnésium. Ce dernier présente une relation inverse par rapport aux bicarbonates.

Les individus qui présentent ce pôle sont : AD1-G, AD2-T, F7, F2 et la source SRD de la campagne de juin et septembre 2013. Indiquant une salinité faible par rapport à la campagne de février 2014.

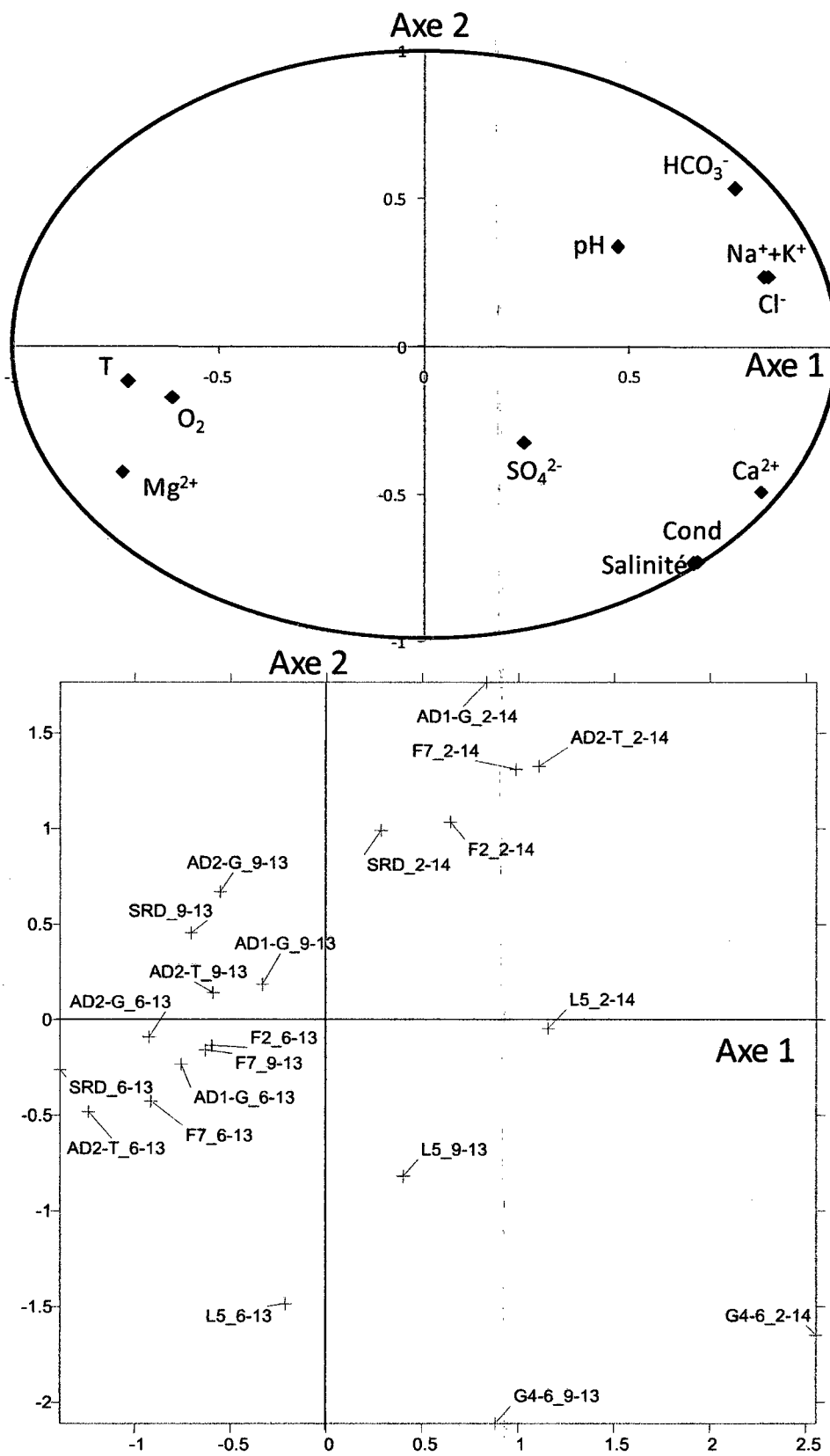


Figure 69 : Projection des variables et des individus sur les axes 1 et 2 (ACP 1)

IV.3.3.2.2. La deuxième ACP

Cette analyse a été effectuée sur 7 variables (la T, pH et l'oxygène dissous n'ont pas été intégrés) et 28 individus (correspondent aux quatre campagnes réalisées).

La projection des variables et des individus est présentée dans la figure 70.

- La projection des variables est présentée seulement sur l'axe 1 qui présente tout seul 83% de la variance. Cet axe présente la salinité naturelle des eaux par une relation proportionnelle entre la conductivité, calcium et les sulfates et une autre relation proportionnelle entre le sodium, le chlorure et les bicarbonates. On observe aussi que ce pôle de salinité est inversement proportionnel au magnésium.
- La projection des individus montre que la salinité liée au gypse est observée seulement aux forages L5 et G4-6. La salinité liée aux sodium, chlorure et les bicarbonates est observée aux forages AD1-G, AD2-T, F2 et F7 durant la campagne de février 2014. Les autres individus sont inversement proportionnels à la salinité, indiquant la faible salinité des eaux.

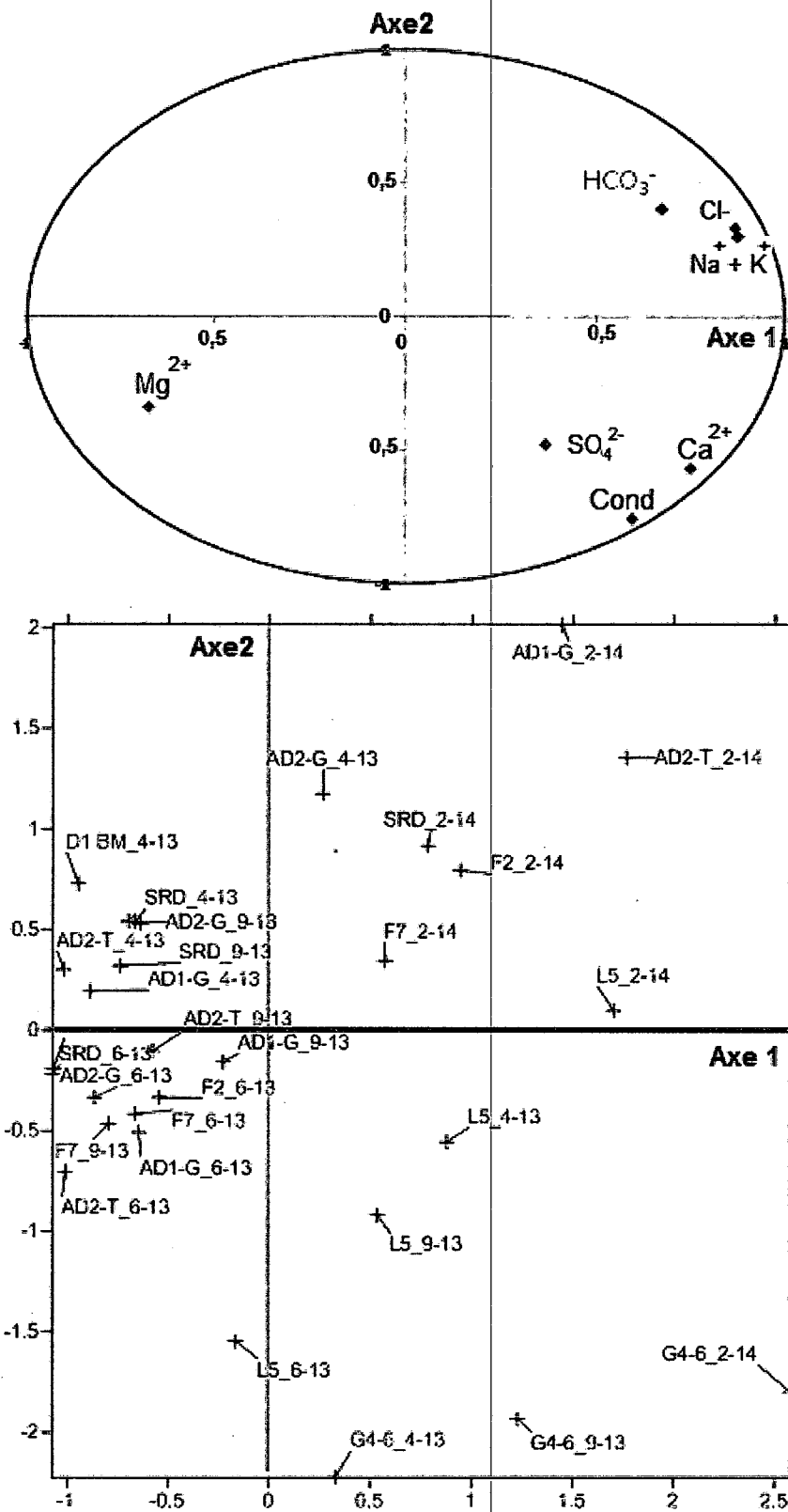


Figure 70 : Projection des variables et des individus sur les axes 1 et 2 (ACP 2)

IV.3.4. Faciès chimiques des eaux

Pour déterminer le faciès chimique des eaux et son évolution dans le temps, nous avons utilisé deux diagrammes : diagramme de Piper et le diagramme de Schoeler Berkaloff

IV.3.4.1. Diagramme de Piper

Ce diagramme montre que le faciès chimique des eaux est hyper chloruré sodique et chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique. Le faciès hyper chloruré sodique est représenté par les forages AD1G, D1-BM, F2, G4-6 et L5 et le faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique est représenté par les forages suivants : AD2-G, AD2-T, F7 et SRD.

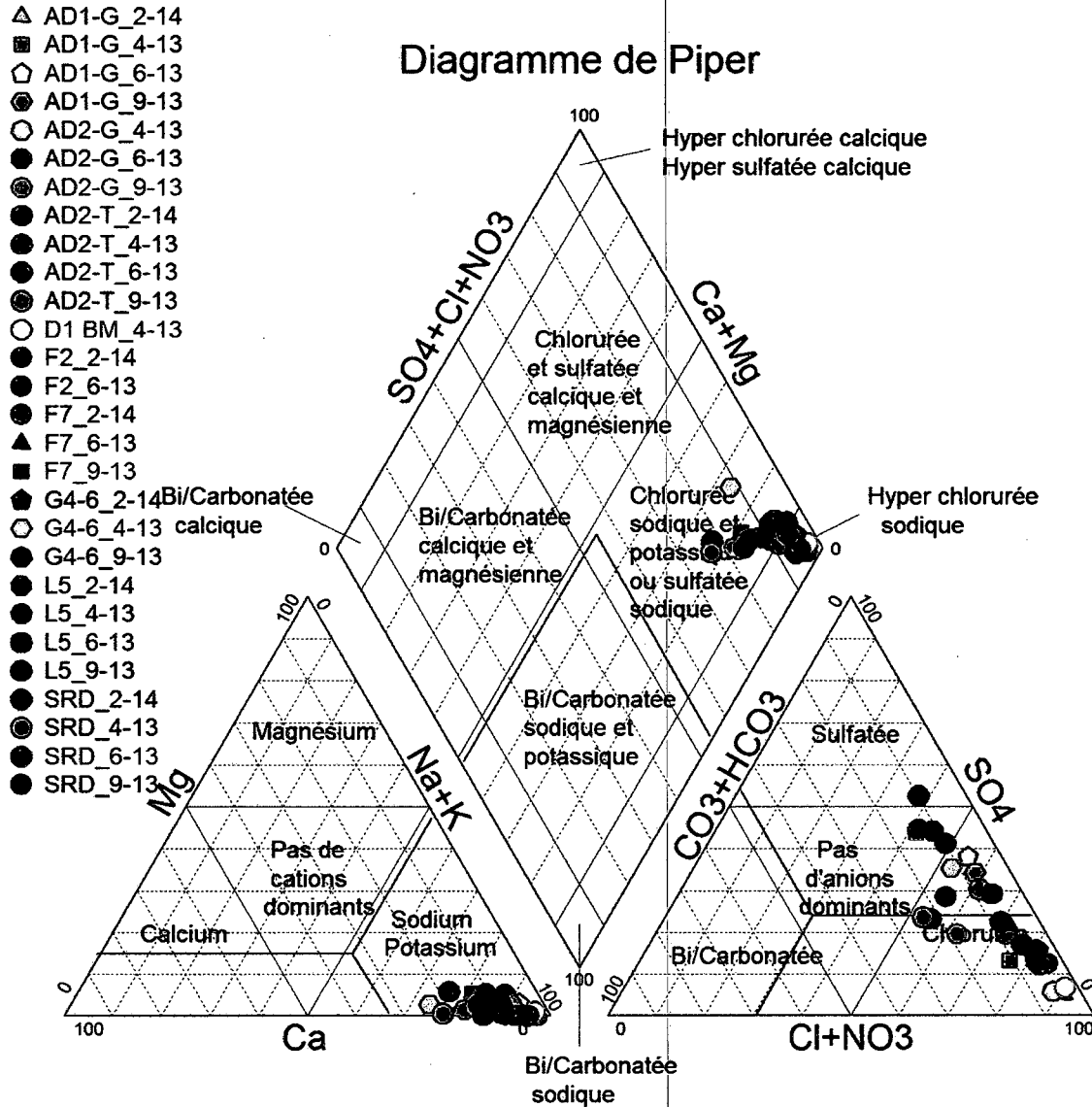


Figure 71 : Présentation des points d'eau sur le diagramme Piper

L'agrandissement de la projection des points sur le losange et par forage est présenté dans la figure 72 :

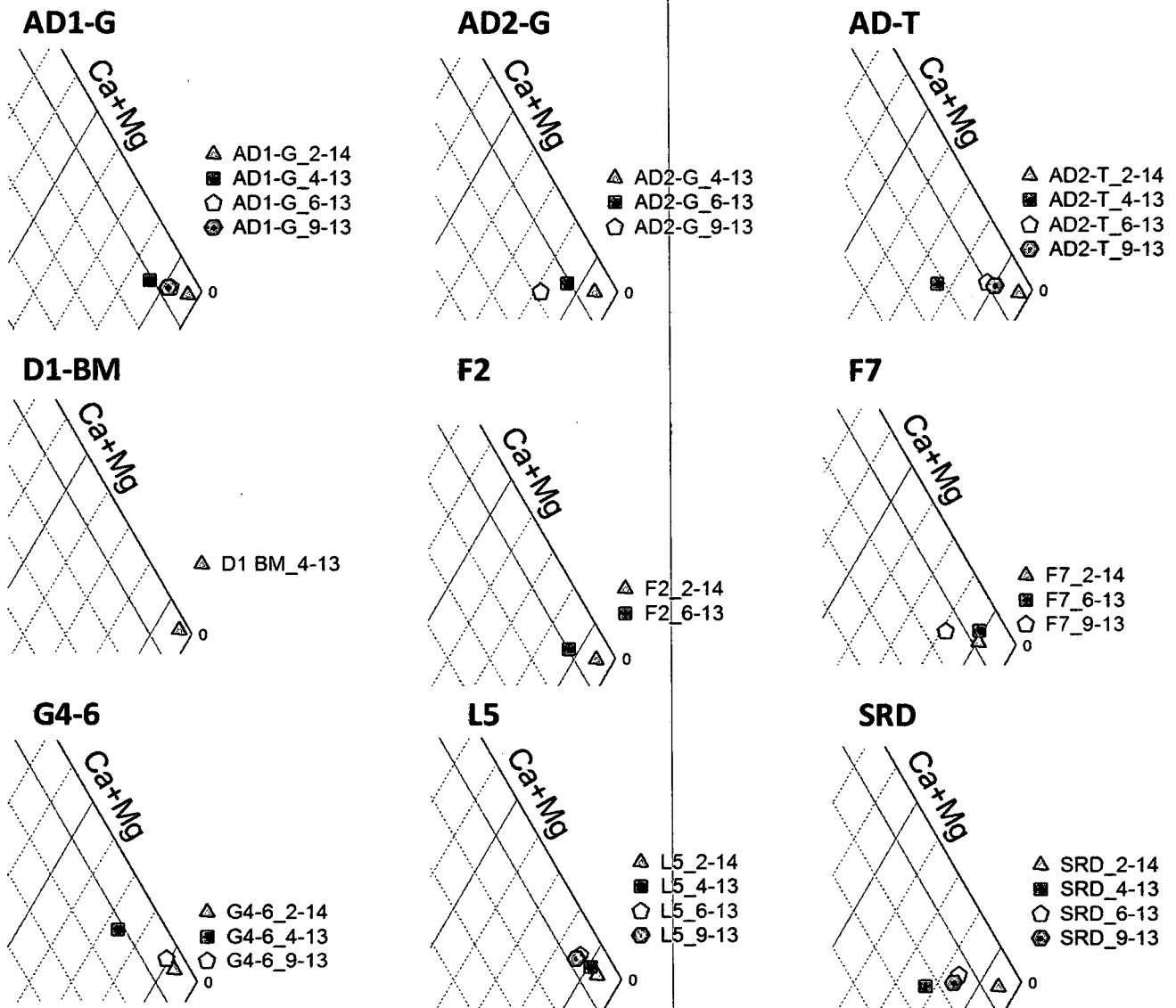


Figure 72 : Projection des points d'eau sur le losange par forage

Ces diagrammes montrent que l'évolution temporelle des forages présente un passage progressif des eaux du faciès chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique vers le faciès hyper chloruré sodique. Cela indique une augmentation des apports chlorurés sodiques d'origine évaporitique (halite)

IV.3.4.2. Diagramme de Schoeler Berkaloff

La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff a été sur deux diagrammes, chacun avec 14 analyses. Cela revient au fait que le logiciel qu'on a utilisé présente au maximum 14 analyses.

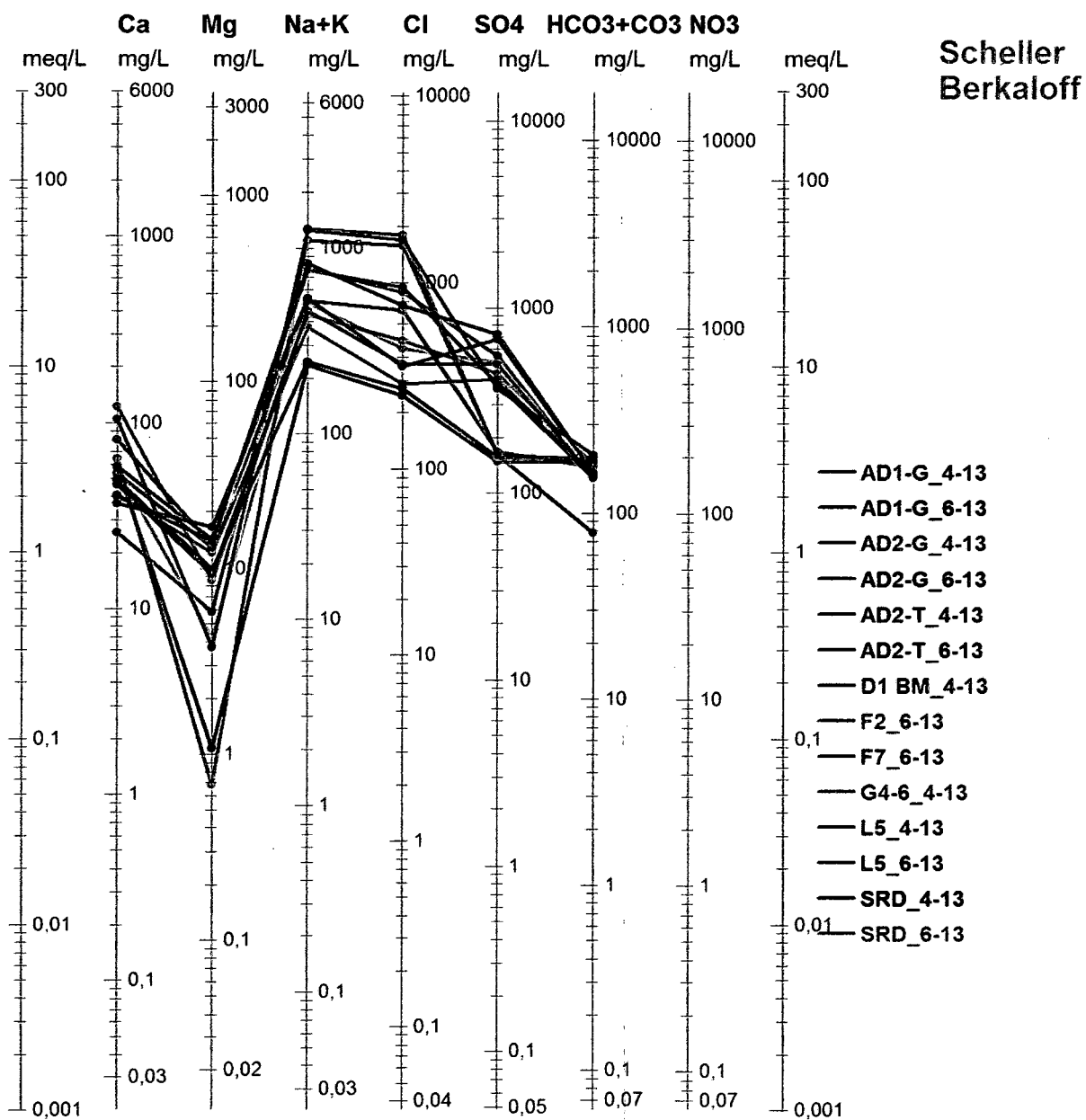


Figure 73 : Présentation de 14 points d'eau sur le diagramme de Schoeler Berkaloff

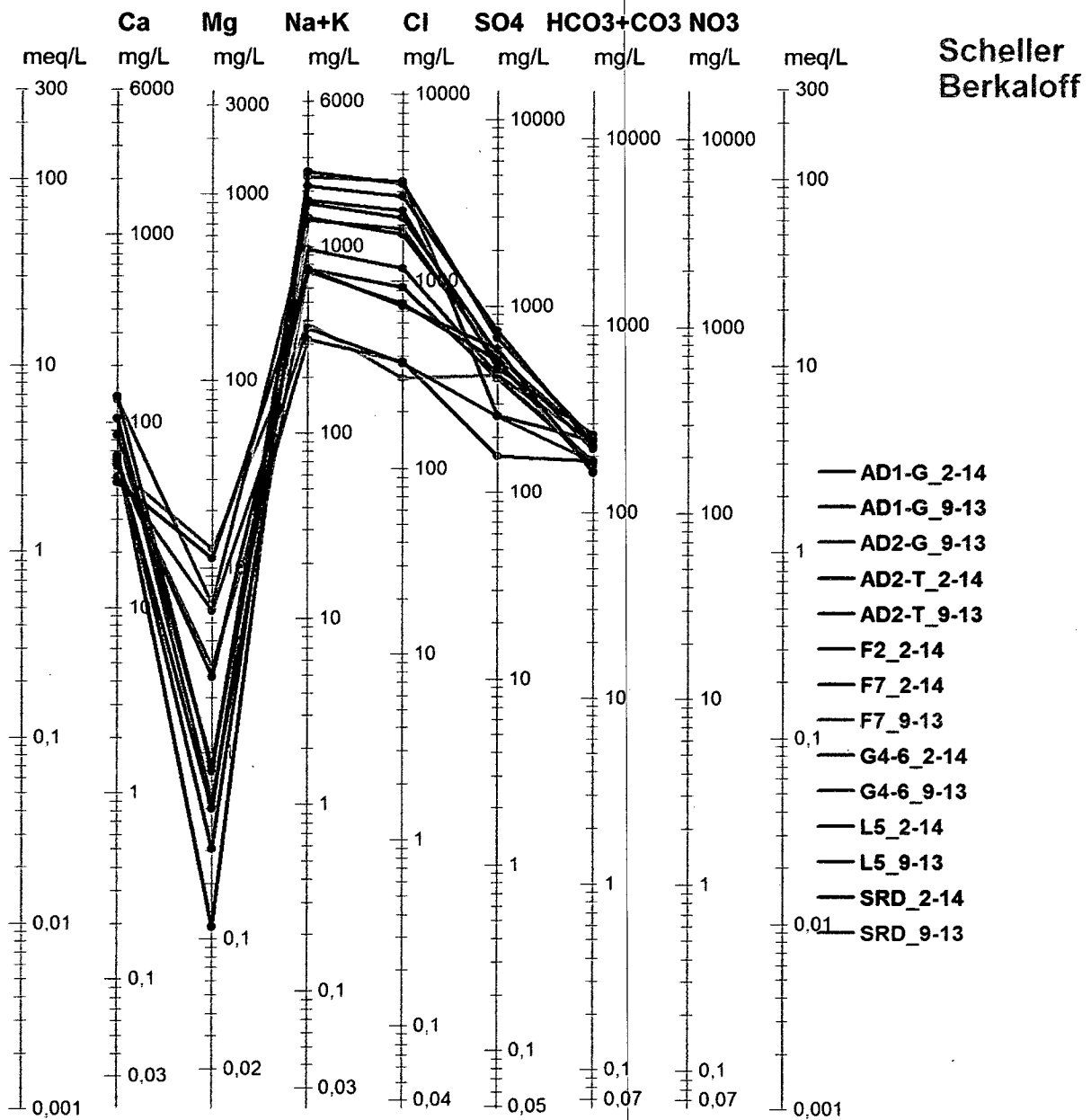


Figure 74 : Présentation de 14 points d'eau sur le diagramme de Schoeler Berkaloff

Ces deux diagrammes (figure 73 et 74) confirment que les ions les plus abondants sont le chlore et le sodium et l'élément chimique le moins abondant est le magnésium.

IV.3.5. Evolution spatio-temporelle de la chimie des eaux

Pour étudier l'évolution spatio-temporelle des eaux de la zone d'étude, nous avons tracé un profil selon la direction Nord-Ouest Sud-Est et qui passe par tous les forages (figure 75).

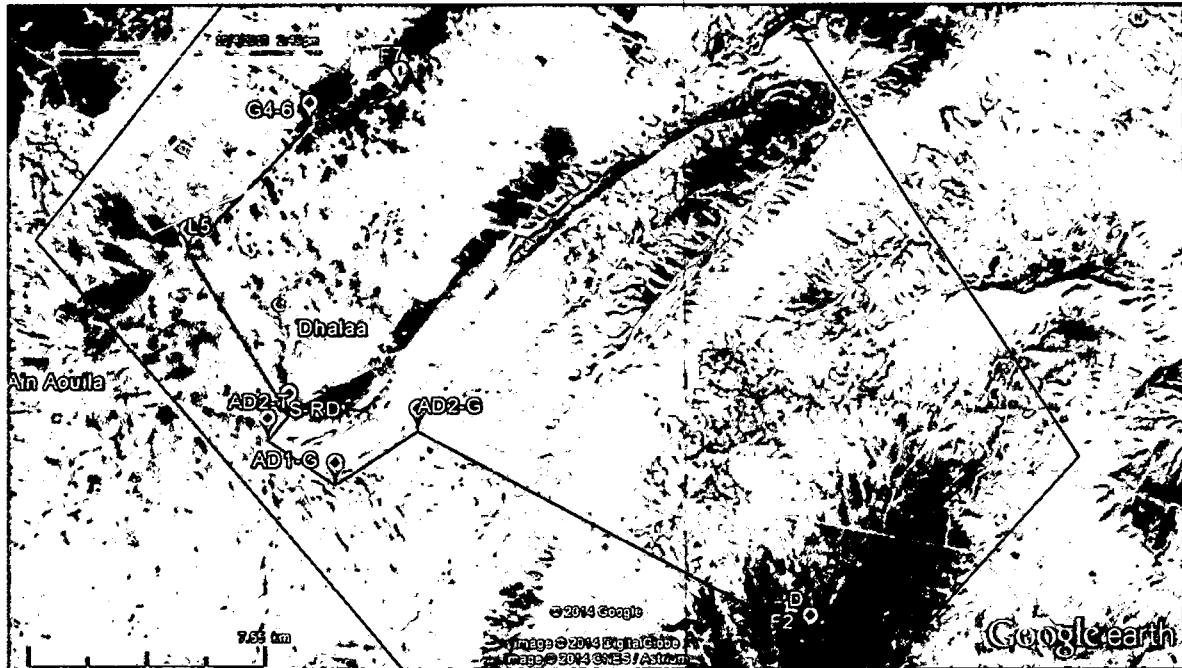


Figure 75 : Position du profil sur la zone d'étude

L'évolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques (figures 76 et 77) montre que :

- Les valeurs les plus élevées de la conductivité sont observées au niveau du bassin de Meskiana avec des valeurs qui varient entre 700 et 2750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On soupçonne un possible échange entre l'oued et la nappe qui donnera une salinité aux eaux des forages, vu que ces forages sont situés sur les deux rives de l'oued Guergoub El-Maleh. Ce dernier prend sa source de chott El-Meragueb (figure 11), qui se caractérise avec une forte conductivité de 32500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette salinité est accompagnée par une augmentation des valeurs des chlorures et du sodium ainsi que les valeurs du calcium, qui indique une origine évaporitique (halite (NaCl) et le gypse (CaSO_4^{2-})) de la salinité.
- Des valeurs faibles de la conductivité et du calcium dans le synclinal de Gourrigueur et le flanc NW de Chéria. Indiquant sa différence par rapport au bassin de Chéria. Cette zone est moins influencée par la dissolution des évaporites. On observe aussi des valeurs élevées du magnésium, du sulfate avec des valeurs élevées pour le sodium et les chlorures durant le mois de février 2014.
- Le flanc NW du synclinal de Chéria est caractérisé par des faibles valeurs de la conductivité et des éléments chimiques.

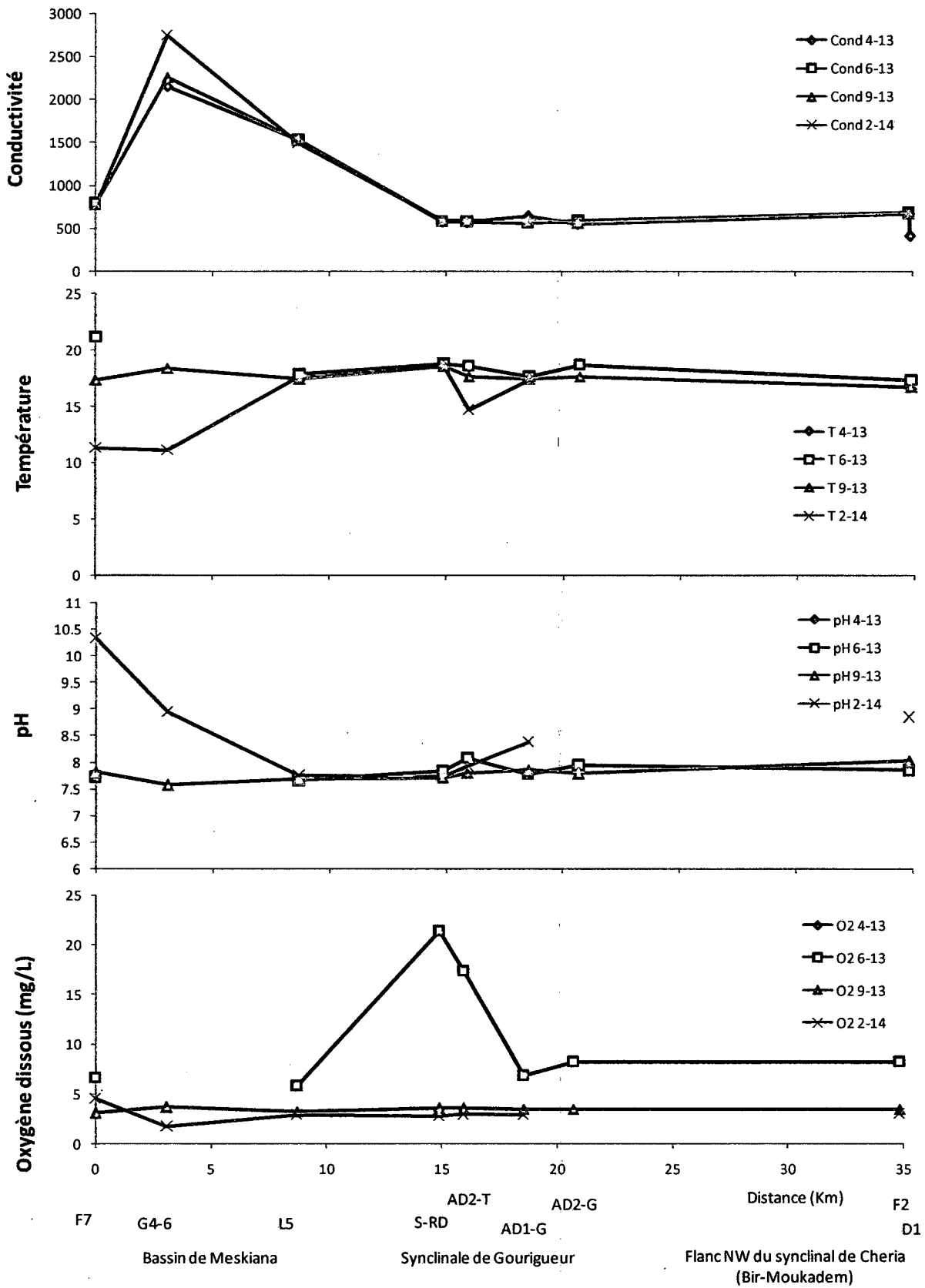


Figure 76 : Evolution spatio-temporelles des paramètres physiques de l'eau de la zone d'étude

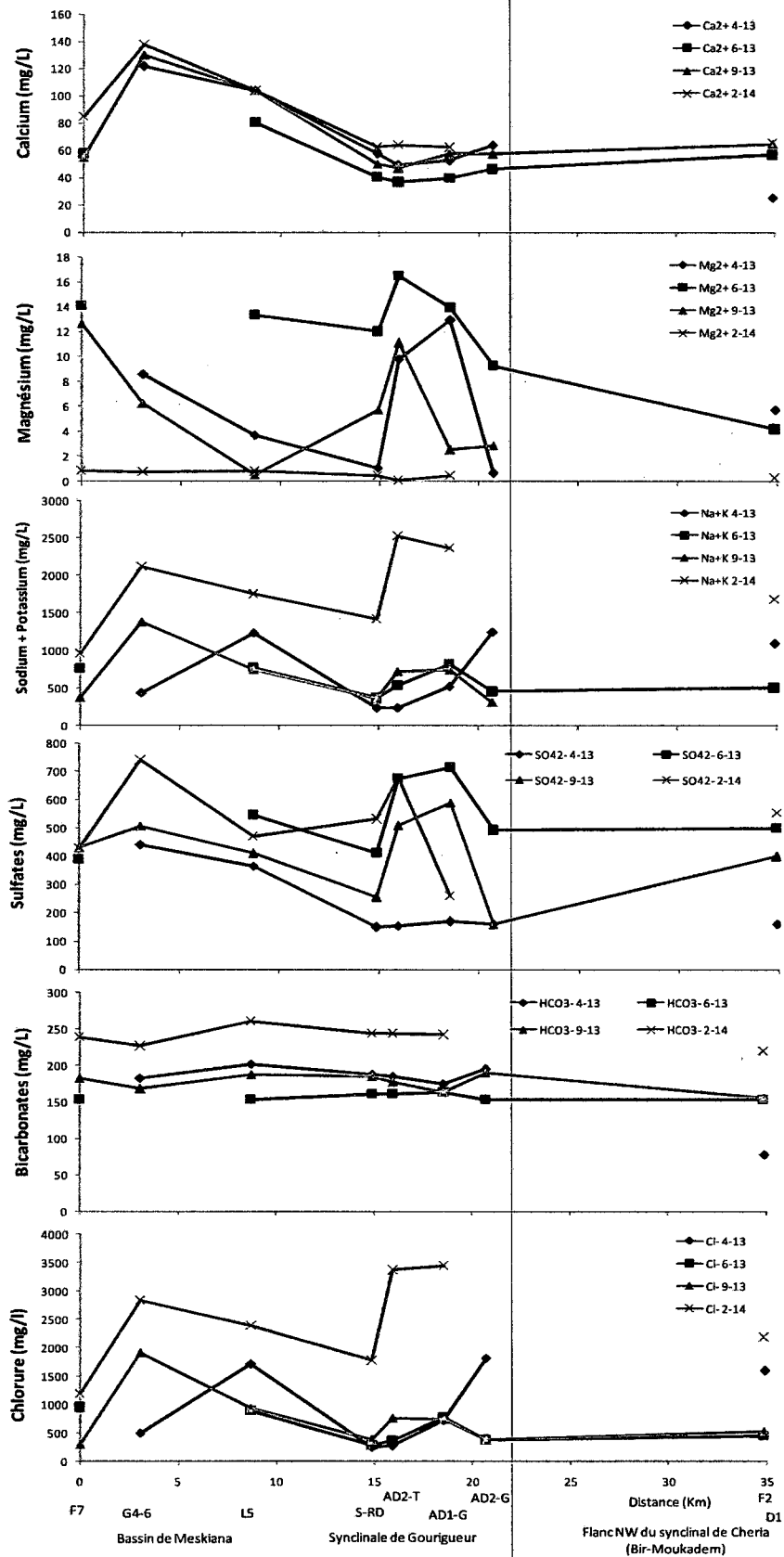


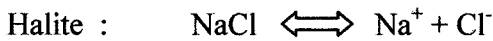
Figure 77 : Evolution spatio-temporelle des éléments chimiques dissouts dans l'eau de la zone d'étude

IV.3.6. Origine des éléments chimiques

Pour déterminer l'origine des éléments chimiques, nous avons utilisé les rapports caractéristiques avec des concentrations en méq/L. Cela nous permettra de connaître si les éléments chimiques existants avec les mêmes quantités que leur origine connu ou il y a d'autres origines.

IV.3.6.1. Couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$

L'origine de ces éléments est liée principalement à la dissolution de l'halite selon la formule suivante :



Dans notre étude, nous allons présenter les concentrations de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ à la place de Na^+ , vu qu'on ne dispose pas des concentrations de Na^+ . La représentation graphique de la concentration des deux espèces chimiques des quatre campagnes du suivi est présentée dans la figure ci-dessous :

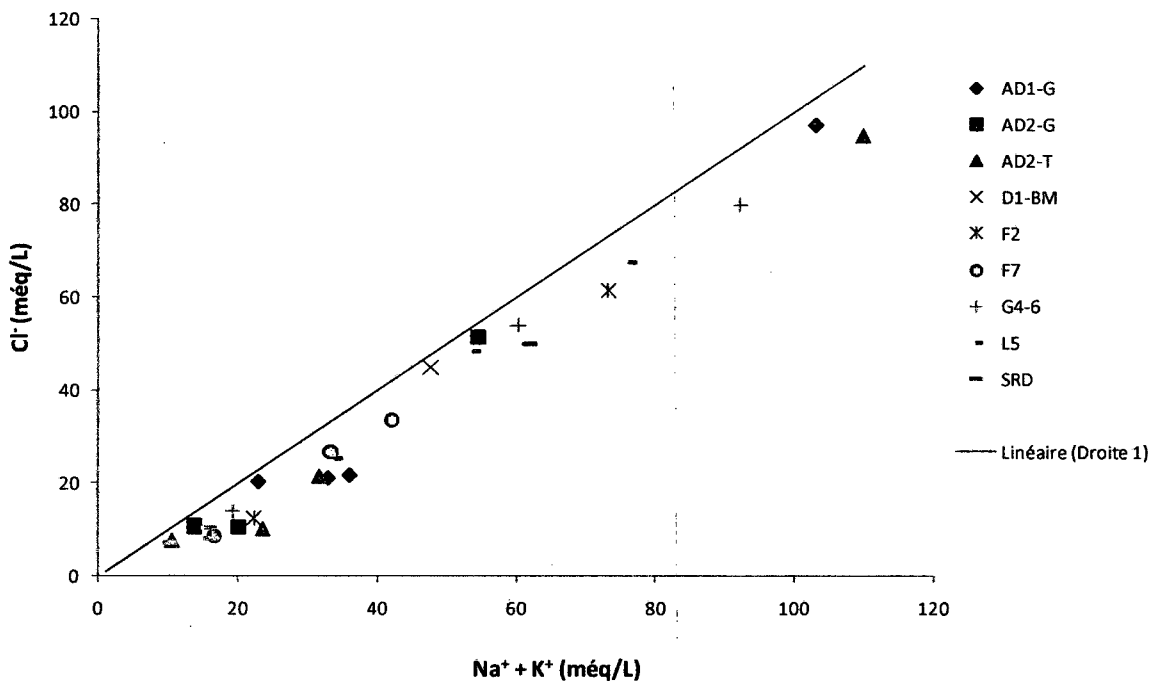


Figure 78 : Rapport caractéristique entre $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ et Cl^-

Ce graphe montre qu'il y a un déficit de Cl^- et un surplus de Na^+ . Indiquant soit qu'il y a une autre origine de Na^+ ou qu'il y a une perte de Cl^- (précipitation chimique, absorption, adsorption...).

IV.3.6.2. Couple $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^-$

Vu la géologie de la zone d'étude qui est composée principalement des formations carbonatées (calcaire et dolomie), dans cette partie, nous essayons de voir si l'origine de calcium est liée seulement aux formations calcaires selon les formules ci-dessous :



La représentation graphique de la concentration des deux espèces chimiques est présentée dans la figure ci-dessous :

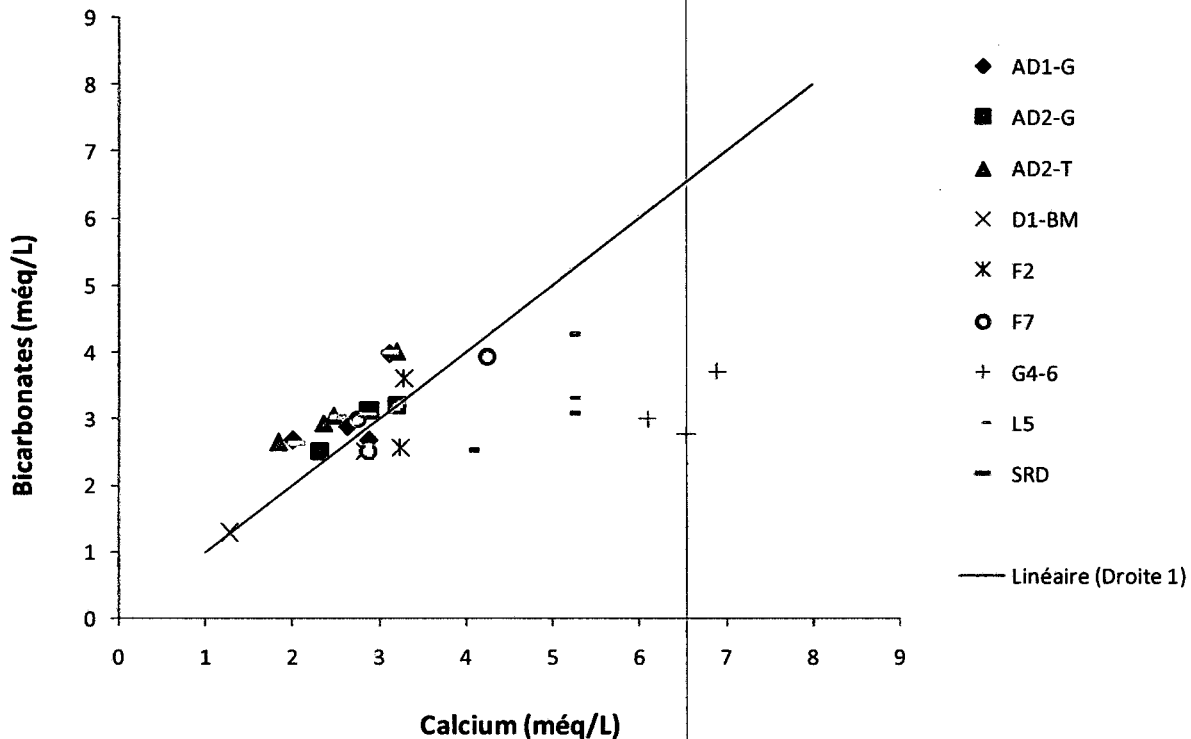
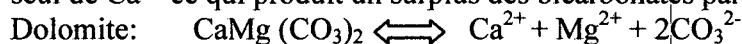


Figure 79 : Rapport caractéristique entre Ca^{+} et HCO_3^{-}

Cette figure montre :

- un surplus des forages du bassin de Meskiana (G4-6, L5), indiquant une autre origine du calcium, probablement la dissolution du gypse, vu les fortes concentrations de ces derniers en sulfates (mg/L). Cela implique aussi que les forages recevront les eaux salées de l'oued Guergoub El-Maleh ;
- un équilibre pour les forages F7, F2, AD2-G, AD1-G, indiquant que l'origine du calcium dans ces captages est liée seulement aux formations carbonatées ;
- un déficit du calcium dans le forage AD2-T, cela implique qu'il y a une autre origine pour les bicarbonates, cas de la dolomite qui selon la formule ci-dessous, produit deux ions de $2CO_3^{2-}$ et un seul de Ca^{2+} ce qui produit un surplus des bicarbonates par rapport au calcium



IV.3.6.3. Couple Ca^{2+} et Mg^{2+} / HCO_3^{-}

Pour confirmer le déficit du calcium dans le forage AD2-T par rapport aux bicarbonates, nous avons présenté dans la figure ci-dessous, la relation entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ et HCO_3^{-} .

Cette figure montre un équilibre pour le forage AD2-T, impliquant que l'origine des bicarbonates est liée aux calcaires et la dolomite.

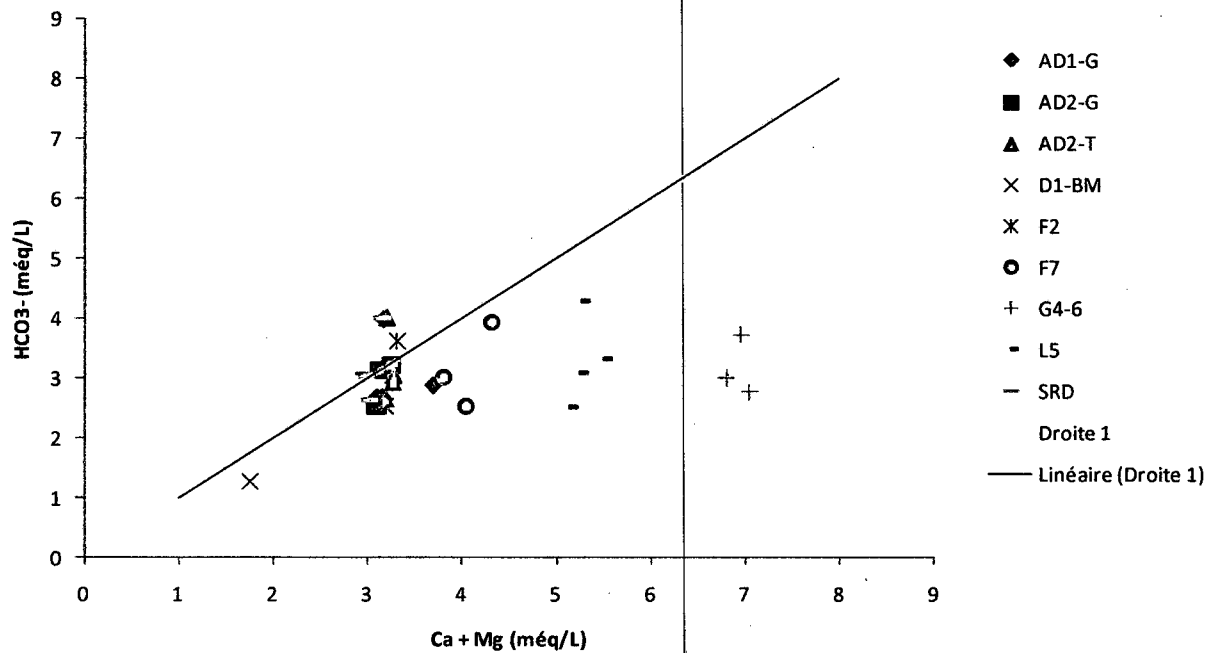
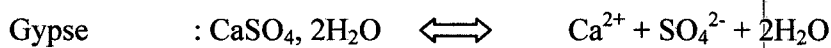


Figure 80 : Rapport caractéristique entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ et HCO_3^-

IV.3.6.4. Couple Ca^{2+} / HCO_3^- et SO_4^{2-}

Nous savons aussi que dans l'entourage de notre zone d'étude (figure 20), il existe des formations triasiques, ce qui implique l'existence des formations gypseuses, ce qui signifié une autre origine du calcium que les formations carbonatées. La formule chimique qui présente la dissolution des formations gypseuses ($CaSO_4$) est présentée par la formule suivante :



La représentation de la relation entre le calcium et les espèces du sulfate et des bicarbonates est présentée dans la figure ci-dessous :

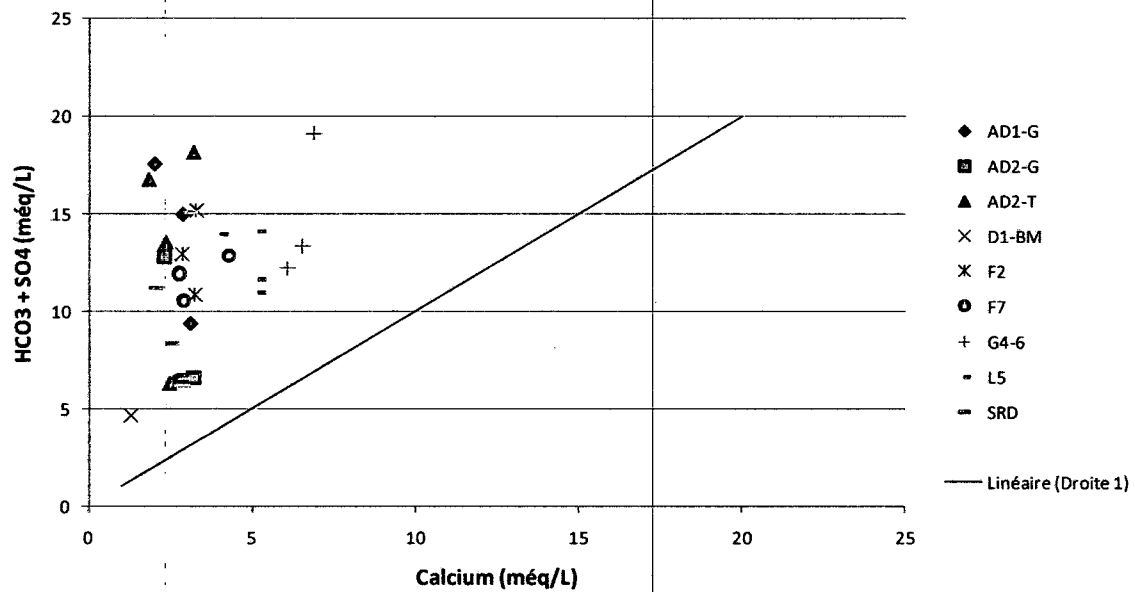


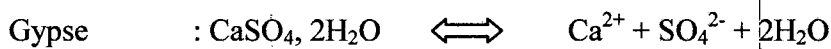
Figure 81 : Rapport caractéristique entre Ca^{2+} et $(HCO_3^- + SO_4^{2-})$

Cette figure montre un grand déficit du calcium par rapport à ces deux espèces chimiques, ce qui implique que :

- le calcium provient seulement d'une origine : les formations carbonatées ou les formations gypseuses.
- qu'il y a une grande diminution des ions du calcium sous l'effet de l'adsorption ou d'autres phénomènes chimiques.

IV.3.6.5. Couple Ca^{2+} / SO_4^{2-}

Pour connaître l'origine des sulfates dans les eaux de la zone d'étude, nous avons fait la relation entre Ca^{2+} et SO_4^{2-} , vu qu'on suppose que l'origine du sulfate c'est les formations gypseuses, selon la formule ci-dessous :



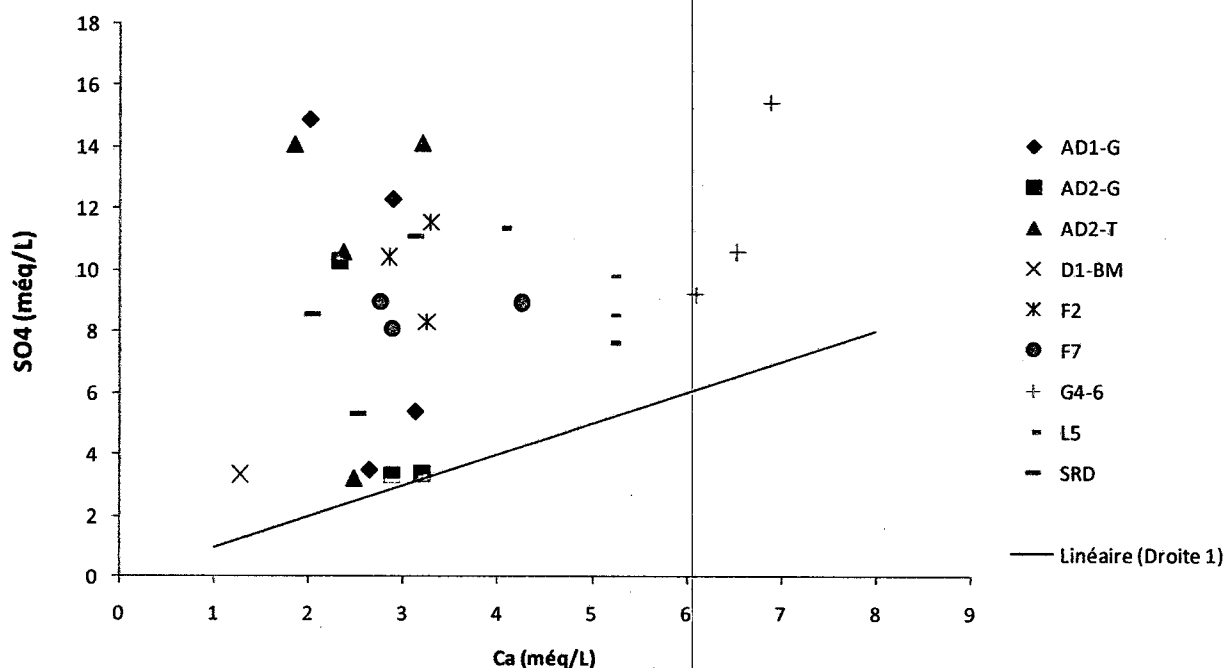


Figure 82 : Rapport caractéristique entre Ca^+ et SO_4^{2-}

Cette figure montre un surplus des sulfates par rapport aux ions du calcium, indiquant une adsorption des ions du calcium ou autres phénomènes chimiques qui retirent le calcium de l'eau.

IV.3.7. Conclusion

Cette partie hydrochimique nous a permis d'avoir la relation qui existe entre les différentes espèces chimiques, les points d'eau (forages, source et chott) et les formations géologiques. Cela a été fait grâce à l'analyse statistique des données, l'évolution spatio-temporelle des espèces chimiques et la relation entre les espèces chimiques.

Parmi les résultats obtenus on cite :

- les eaux de la nappe traversent les formations évaporitiques du Trias, vu qu'elles présentent des valeurs élevées en Na^+ et Cl^- ainsi qu'en SO_4^{2-} ;
- la possibilité d'une recharge de la nappe du bassin de Meskiana à partir de l'oued Guergoub El-Maleh, vu la forte salinité des forages qui se situent sur les rives de l'oued ;
- L'existence de deux eaux différentes de point de vu chimique, l'une caractérisée par de fortes valeurs de la conductivité (bassin de Meskiana) et l'autre avec de faibles valeurs de la conductivité (synclinal de Gourrigueur et le flanc NW du synclinal de Chéria (Bir-Mokadam).

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale et recommandations

Le système aquifère du milieu fissuré est considéré comme l'aquifère le plus difficile à étudier, vu ses discontinuités et ses hétérogénéités. L'utilisation d'une approche multidisciplinaire qui fait combiner la géologie, la tectonique, la géophysique, l'hydrologie, l'hydrodynamique et l'hydrochimie...

Les études géologique, géophysique et hydrogéologique montrent que la zone d'étude est composée principalement de trois systèmes aquifères : l'aquifère des calcaires du Maestrichtien qui constitue le principal réservoir du synclinal de Gourrigueur (ex. Ain Dalaa) ; l'aquifère des calcaires de l'Eocène qui constitue l'aquifère principal de la partie Nord du plateau de Chéria et l'aquifère Mio-plio-Quaternaire – Turonien du bassin de Meskiana. Ces études nous ont permis aussi de déterminer la géométrie des systèmes aquifères.

Le calcul du bilan hydrique par la méthode de Thornthwaite nous a permis de montrer que la recharge de la nappe à travers les alluvions est nulle et que la recharge se fait à travers la fissuration qui se présente dans les calcaires qui affleurent dans les sommets.

L'étude hydrologique a fait apparaître que la zone d'étude se trouve sur deux bassins versants différents : l'un exoréique et l'autre endoréique. L'étude statistique des données des précipitations a montré aussi une différence entre les deux bassins versants, ce qui implique que la recharge sera différente entre les deux zones.

L'utilisation du modèle de fissuration dans les plissements nous a permis de prévoir l'écoulement dans les aquifères de la zone d'étude et de dresser un modèle conceptuel pour le fonctionnement hydrodynamique.

L'utilisation des réponses hydrodynamiques dans les forages et dans les piézomètres nous a permis aussi de déterminer l'écoulement préférentiel lié à la forte fissuration ou à l'existence d'une faille.

L'étude hydrochimique nous a fait apparaître :

- L'existence de deux zones différentes de point de vue chimique : l'une avec des salinités élevées (bassin de Meskiana) et l'autre avec de faibles à moyennes valeurs de la conductivité (synclinal de Gourrigueur et le flanc NW du synclinal de Chéria (Bir Mokadam))
- Une recharge de la nappe de Meskiana par l'oued Guergoub El-Maleh (oued Meskiana).
- Deux origines principales des éléments chimiques qui composent l'eau de la zone d'étude : l'une évaporitique à travers la dissolution de l'halite et le gypse du Trias et l'autre carbonaté par la dissolution du calcaire et de la dolomite.

Pour compléter ce travail de recherche, nous recommandons de faire un suivi du débit et de la chimie des sources, d'étendre la zone d'étude jusqu'au synclinal de Chéria, de faire suivre plus de forage et de piézomètres, d'appliquer les résultats obtenus sur les synclinaux de Gourrigueur et de Chéria et enfin de faire un modèle sur le fonctionnement hydrodynamique.

Bibliographie

- Al-fares W. 2002.** Caractérisation des milieux aquifères karstiques et fracturés par différentes méthodes géophysiques. Thèse Doctorale, Université Montpellier II. 213p.
- Ameen M. S., 1988.** Folding of layered cover due to dip-slip basement faulting. Unpublished PhD Thesis, University of London.
- Aouissi A. 2010.** Microbiologie et physico-chimie de l'eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-Est de l'Algérie). Mémoire de Magister. Université de Guelma. 141p.
- Azizi Y. 2011.** Influence des conditions hydrogéologiques et géotechniques du système karstique de Chéria sur la stabilité et l'aménagement. Mémoire de Magister. Université de Tébessa. 181 p.
- Baali F. 2007.** Contribution à l'étude hydrogéologique, hydrochimique et Vulnérabilité à la pollution d'un système aquifère karstique en zone semi aride. Cas du plateau de Chéria N. E. Algérien. Thèse de Doctorat. Université d'Annaba. 163 p.
- Bakalowicz M. 1979.** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Doctorat ès Sciences naturelles, Université P. et M. Curie Paris-6. Laboratoire Souterrain du CNRS, 269 p.
- Bazalgette L. 2004.** Relations plissement/fracturation multi échelle dans les multicouches sédimentaires du domaine élastique/fragile : Accommodation discontinue de la courbure par la fracturation de petite échelle et par les articulations. Possibles implications dynamiques dans les écoulements des réservoirs. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 252 p.
- Benjamin G. 2007.** Etude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques : expérimentation hydrodynamique et hydrochimique sur les sites du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) de Rustrel et de Fontaine de Vaucluse. Thèse Doctorale, Université Avignon et Pays de Vaucluse. 213 p.
- Bureau d'étude et de réalisations en Génie Civil et Hydraulique (BEREGH). 2007.** Etude géophysique par prospection électrique dans la région de Gourigueur wilaya de Tébessa. Kouba Alger.
- Chaffai H., Laouar R., Hani A., Baali F. 2006.** Les formations karstiques du plateau de Chéria (Algérie). Identification et évaluation des ressources en eau. Larhyss Journal, n 05, pp.121-131
- Chamekh K. 2011.** Relation fracturation-morphologie implications hydrogéologique : exemple des calcaires fissurés de la région de Chéria. Mémoire de Magister. Université de Tébessa. 168 p.
- Cheddad S. 2009.** Apport de l'étude hydrogéologique dans l'étude et le traitement des glissements de terrains cas du site de Bougaa. Algérie Nord orientale. 112 p.
- Compagnie Générale de Géophysique. 1970.** Prospection géophysique sur le plateau de Chéria. R.A.D.P. Service des études Scientifiques, Secrétariat d'état à l'Hydraulique, Dpt d'Annaba, Rapport 26 p.

- Daher W. 2011.** Étude de faisabilité de recharge artificielle dans un aquifère karstique côtier. Thèse Doctorale, Universités Montpellier II et St Joseph de Beyrouth. 214p.
- Deleau P. et Laffitte R. 1951.** Carte géologique du Nord-Est Algérien, échelle 1/500 000. Publié par le Service de la Carte Géologique de l'Algérie.
- De Waele, J., Plan, L. and Audra, P., 2008.** Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. *Geomorphology*, 2775.
- Djebari H. 2011.** Ressources et essai de gestion intégrée des eaux du bassin d'El Malabiod, W. de Tébessa, Nord- Est Algérien. Mémoire de magister. Université de Annaba. 160 p.
- Dib I.** L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaine-Ain Yaghout (Est Algérien). 127 p.
- Dörfliger N., Crochet Ph., Guerrin R., Jozja N., Marsaud B., Mondain P H., Muet Ph., Plagnes V. 2010.** Guide méthodologique Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. Document public BRGM/RP-58237-FR, 246 p.
- Durozoy G. 1952.** Etude hydrogéologique du synclinal de l'Ain Dalaa. XIXème Congrès Géologique International « La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie » à Alger (Algérie), tome 2, pp. 130-143.
- Gaagai A. 2009.** Etude hydrologique et hydrochimique du bassin versant du barrage de Babar sur oued El Arab région Est de l'Algérie. 113 p.
- Gerbaux G. 2009.** Impact de la fracturation et de la karstification sur la dynamique des eaux souterraines dans le Larzac. Master BGAE Parcours « Géodynamique », Université Montpellier 97p.
- Gouaidia L. 2008.** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana Nord- Est Algérien. Doctorat en science. Université de Annaba. 130 p.
- Hireche S. (en cours).** Analyse multi-scalaire de la fracturation du réservoir éocène du synclinal de Dalaa (Algérie Nord orientale). Mémoire de Magister, Géologie Appliquée, Université de Jijel
- Keunen P. H. and de Sitter L. U., 1938.** Experimental investigation into the mechanisms of folding. *Leidsche Geol. Mag.*, Vol. 10, Pages 217-240,
- Lambert et Durozoy 1947.** Compte rendu la tournée effectuée dans la région de Tébessa (plateau de Chéria) A.N.R.H Tébessa. 40p
- Mangin, A., 1975.** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Troisième partie : constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat ès Science, Université de Dijon. *Annales Spéléologiques*, 1975, 30 (1), pp. 21-124.

- Mangin A. 1984.** Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. hydrol.*, 67, p. 25-43.
- Marsaud B. 1996.** Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Document BRGM Thesis, Paris XI Orsay, 300 p.
- Pochon A. & Zwahlen F. 2003.** Guide pratique. Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP et par l'Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG, Berne, 83 p.
- Ramberg H., 1964.** Selective buckling of composite layers with contrasted rheological properties; a theory for simultaneous formation of several orders of folds. *Tectonophysics*, Vol. 1, Pages 307-341.
- Ramsay J. G. and Huber M. I. 1987.** The techniques of modern structural geology, Vol. 2: Folds and Fractures, Academic Press Editions, 700 pages.
- Rejesk F. 2002.** Analyse des eaux ; Aspects Réglementaires Et Techniques. Sceren. Paris. 360p.
- Rodier J. 1996.** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^e édition Dunod, Paris.
- Rodier J. 2005.** L'analyse de l'eau ; Eaux Naturelles, Eaux Résiduelles, Eaux De Mer. 8^e édition. Dunod. 1383 p.
- Salomon, J.N., 2006.** Précis de karstologie. Presses Univ de Bordeaux.
- Schoeller H. 1962.** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. Editions, 642 pages.
- Stearns D. W., 1964.** Macrofracture patterns on Teton anticline N.W. Montana, *A. G. U.*, 45.
- Stearns D. W. and Friedman M., 1972.** Reservoirs in fractured rocks, *A. A. P. G. Bulletin*, 16, Pages 82-106,
- Suppe J. 1985.** Principles of structural geology, Prentice-Hall, Inc., 537 p.
- Vila J.M. 1977.** Carte géologique de Dalaa au 1/ 50 000 SONATRACH.
- Vila JM. 1977.** Notice explicative de la carte géologique au 1 /50 000 de Dalaa (Ex-Dalaa). Première édition, Sonatrach, Direction des Mines et de la Géologie, Service de la carte géologique de l'Algérie, 9p.
- Zereg S. 2010.** Impact des retours d'eau d'irrigation sur la ressource en eau souterraine des régions semis arides, exemple des plaines de Tébessa, Chéria et El Ma El Abiod, Est Algérien. 109 p.
- Ziani D. 2009.** Impact de la pollution agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraine de l'aquifère de Ain Djasser. Est Algérien. Mémoire de magister. Université de Batna. 133 p.

Annexes

Annexe I

(Hydroclimatologie)

Paramètre Mois	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Exc (mm)	DA (mm)
Jan	20,1	9,89	9,89	14,97	0	0
Fév	14	13,99	13,99	14,98	0	0
Mar	19,2	30,75	30,75	3,43	0	0
Avr	21,4	41,77	24,83	0	0	16,94
Mai	34,5	85,98	34,5	0	0	51,48
Juin	19	124,4	19	0	0	105,42
Juil	4,4	159,7	4,4	0	0	155,3
Août	16,3	147	16,3	0	0	130,7
Sep	23,9	105,36	23,9	0	0	81,46
Oct	20,6	67,28	20,6	0	0	46,68
Nov	31,1	32,36	31,1	0	0	1,26
Déc	19,9	15,14	15,14	4,76	0	0
Total	244,4	833,64	244,4	-	0	589,24

Tableau : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite – station de Dalaa.

Paramètre Mois	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Exc (mm)	DA (mm)
Jan	27,3	10,97	10,97	19,3	0	0
Fév	14,6	15,08	15,08	18,82	0	0
Mar	22,4	32,25	32,25	8,97	0	0
Avr	28,1	43,42	37,07	0	0	6,35
Mai	42,8	89,25	42,8	0	0	46,45
Juin	15,3	129,4	15,3	0	0	114,4
Juil	3,1	167	3,1	0	0	163,9
Août	16,1	153,77	16,1	0	0	137,67
Sep	28,1	109,77	28,1	0	0	81,67
Oct	24,2	69,82	24,2	0	0	45,62
Nov	22,7	33,68	22,7	0	0	10,98
Déc	19,2	16,23	16,23	2,97	0	0
Total	263,9	870,68	263,6	-	0	607,04

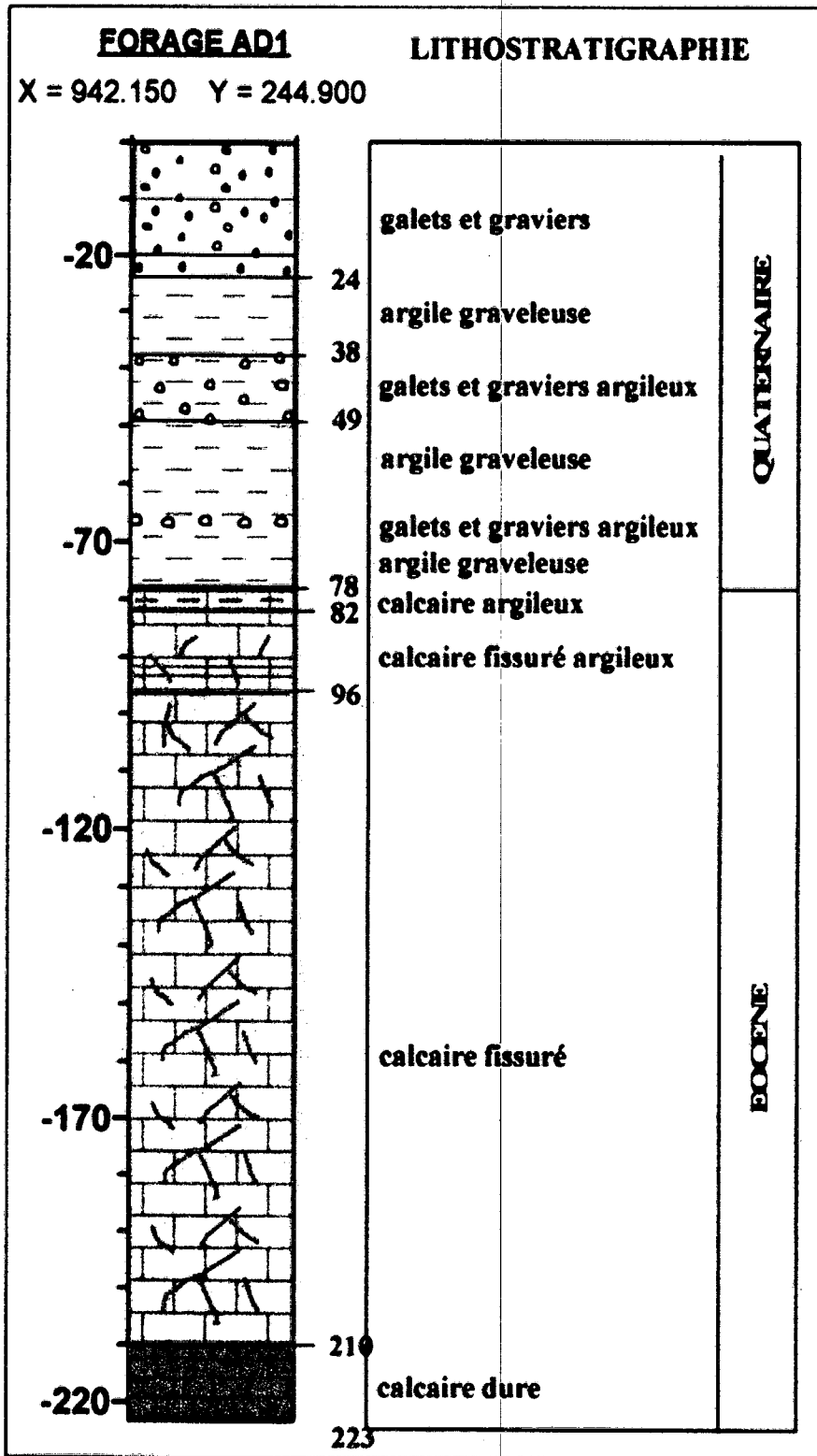
Tableau : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite – station de Meskiana.

Paramètre Mois	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)	Exc (mm)	DA (mm)
Jan	21,6	8,81	8,81	19,34	0	0
Fév	16	13,08	13,08	22,26	0	0
Mar	24,5	29,54	29,54	17,22	0	0
Avr	25,1	40,22	40,22	2,1	0	0
Mai	38,6	83,29	40,7	0	0	42,59
Juin	26,6	119,9	26,6	0	0	93,3
Juil	12,8	153,58	12,8	0	0	140,78
Août	23,5	141,41	23,5	0	0	117,91
Sep	39,2	101,7	39,2	0	0	62,5
Oct	27,3	65,24	27,3	0	0	37,94
Nov	21,1	31,25	21,1	0	0	10,15
Déc	20,8	14,25	14,25	6,55	0	0
Total	297,1	802,27	297,1	-	0	505,17

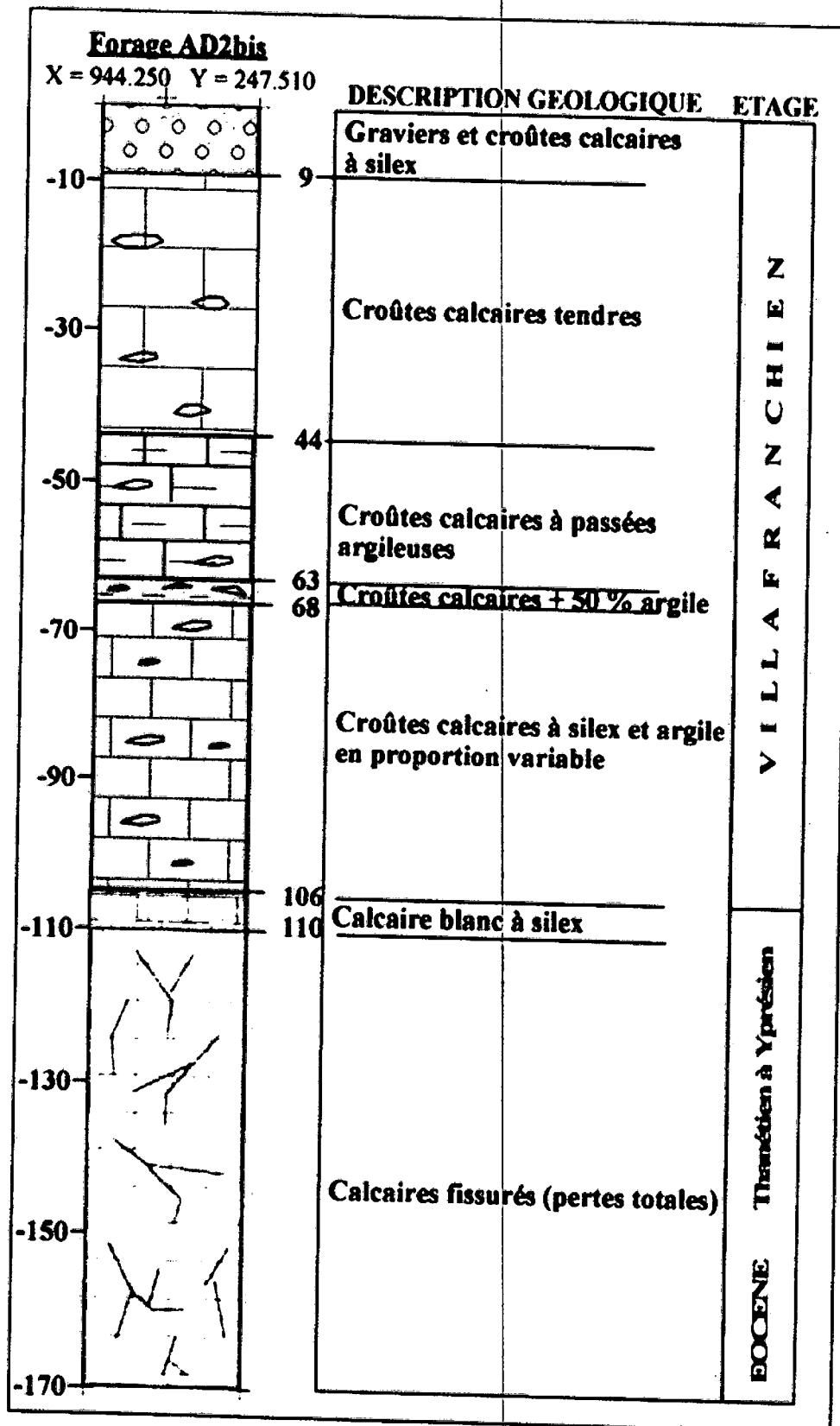
Tableau : Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite – station de Chéria.

Annexe II

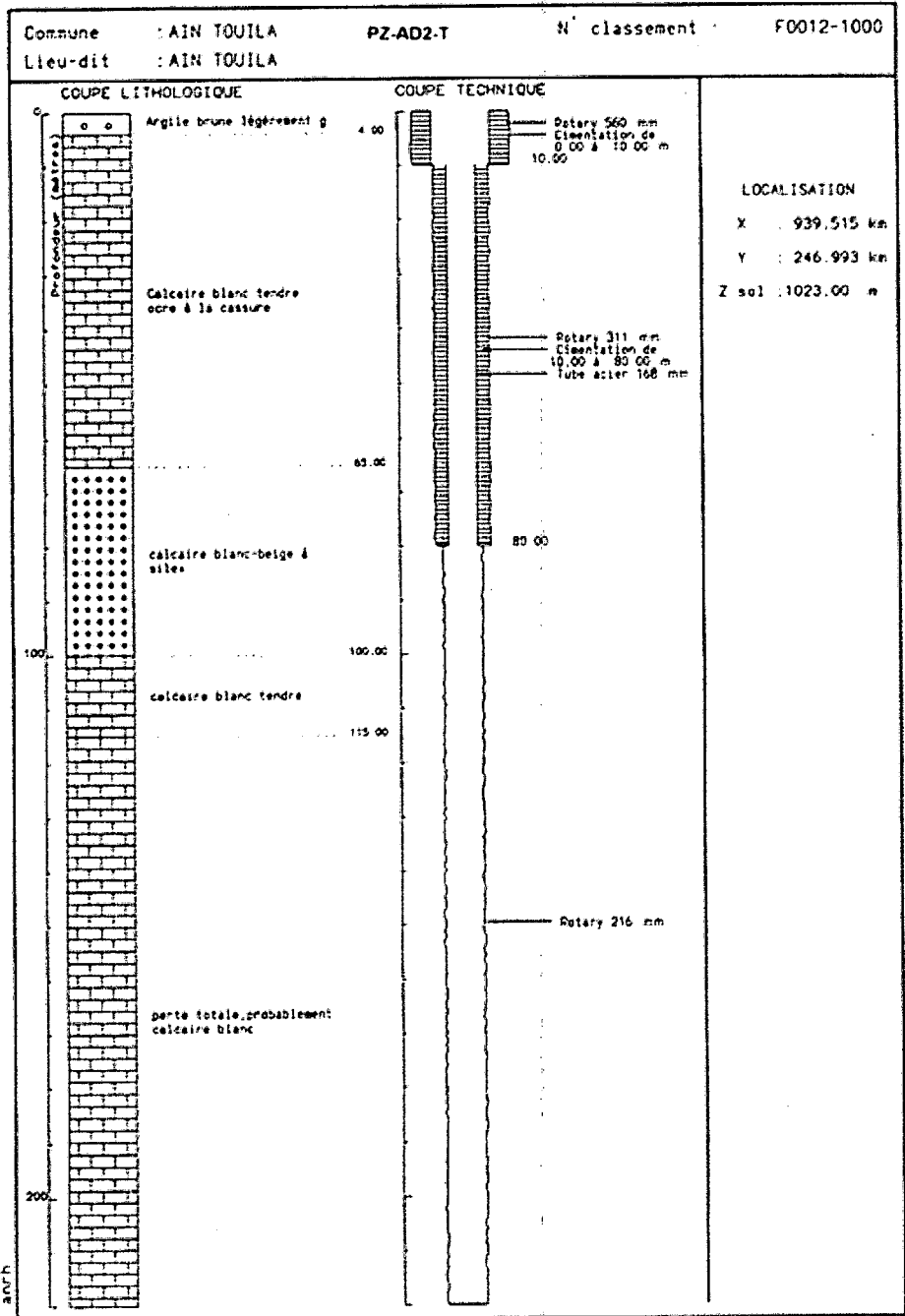
(Log stratigraphique des forages)



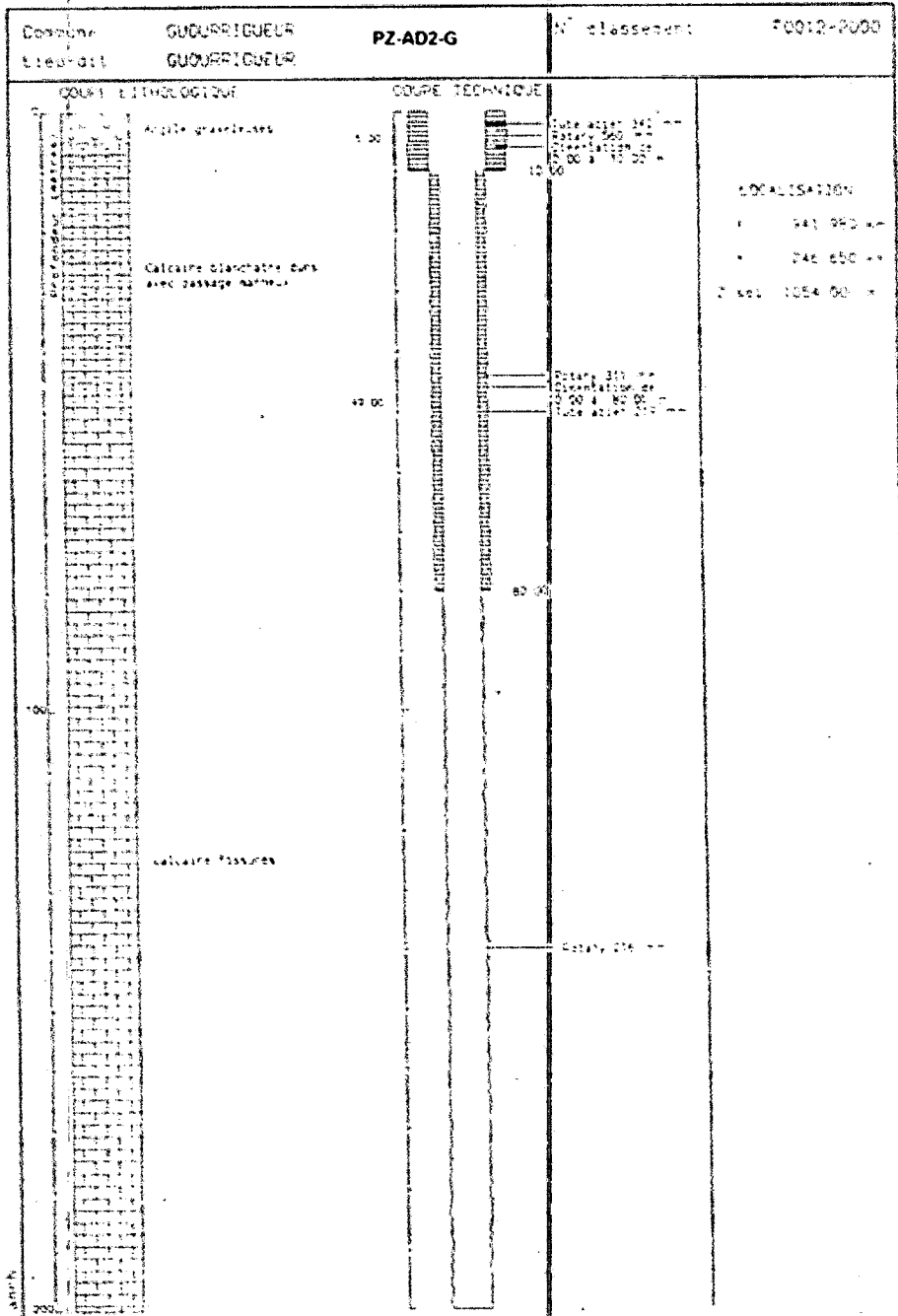
Log stratigraphique du forage AD1-G (BEREGH. 2007)



Log stratigraphique du forage AD2-G (BEREGH. 2007)



Log stratigraphique du Piézomètre Pz-AD2-T (BEREGH. 2007) Rapport ANRH



Log stratigraphique du Piézomètre Pz-AD2-G (BEREGH. 2007) Rapport ANRH

Annexe III

(Hydrochimie)

Nom des échantillons	Ca ⁺⁺ (méq/L)	Mg ⁺⁺ (méq/L)	Na ⁺ (méq/L)	HCO ₃ ⁻ (méq/L)	Cl ⁻ (méq/L)	SO ₄ ⁻⁻ (méq/L)	c25°C
D1	1,282	0,488	47,66	1,28	44,8	3,35	412
AD2-G	3,206	0,0576	54,4864	3,2	51,2	3,35	555
AD1-G	2,64	1,08	22,88	2,88	20,2	3,52	640
S-RD	2,88	0,091	10,209	3,08	7	3,1	577
AD2-T	2,48	0,82	10,57	3,04	7,6	3,23	575
G4-6	6,092	0,724	19,164	3	13,8	9,18	2160
L5	5,21	0,31	53,7	3,2	48,4	7,62	1540

Analyses chimique de la première campagne (Avril 2013)

Nom	Ca ⁺⁺ (méq/l)	Mg ⁺⁺ (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Cl ⁻ (méq/l)	SO ₄ ⁻⁻ (méq/l)	c25°C
F2	2,85	0,352	22,24	2,52	12,48	10,44	681
AD2-G	2,32	0,776	20,09	2,52	10,40	10,27	593
AD1-G	2,00	1,164	36,01	2,68	21,60	14,90	565
S-RD	2,04	1,004	16,15	2,64	8,00	8,56	581
AD2-T	1,84	1,376	23,62	2,64	10,10	14,10	582
L5	4,05	1,112	33,96	2,52	25,20	11,40	1528
F7	2,89	1,176	33,29	2,52	26,75	8,08	794

Analyses chimique de la deuxième campagne (Juin 2013)

Nom	Ca ⁺⁺ (méq/l)	Mg ⁺⁺ (méq/l)	Na ⁺ (méq/l)	HCO ₃ ⁻ (méq/l)	Cl ⁻ (méq/l)	SO ₄ ⁻⁻ (méq/l)	c25°C
AD2-G	2,89	0,24	13,81	3,12	10,5	3,31	568
AD1-G	2,89	0,21	32,89	2,68	21	12,31	592
S-RD	2,53	0,48	15,75	3,04	10,4	5,31	589
AD2-T	2,36	0,93	31,73	2,92	21,5	10,60	584
G4-6	6,53	0,53	60,28	2,76	54	10,58	2260
L5	5,21	0,05	32,87	3,08	26,5	8,54	1531
F7	2,77	1,06	16,64	3	8,5	8,96	784

Analyse chimique de la troisième campagne (Septembre 2013)

Nom des échantillons	Ca ⁺⁺ (méq/L)	Mg ⁺⁺ (méq/L)	Na ⁺ (méq/L)	HCO ₃ ⁻ (méq/L)	Cl ⁻ (méq/L)	SO ₄ ⁻⁻ (méq/L)	c25°C
F7	4,24848	0,07152	42,04	3,9	33,5	8,94	772
G4-6	6,89376	0,06624	92,22	3,7	80	15,46	2750
L5	5,2104	0,0696	76,31	4,3	67,5	9,81	1496
S-RD	3,12624	0,04176	61,92	4,0	50	11,08	586
AD2-T	3,2064	0,0096	109,93	4,0	95	14,15	588
AD1-G	3,12624	0,04176	103,22	4,0	97	5,42	589
F2	3,28656	0,02544	73,33	3,6	61,5	11,54	667
Chott El Meragueb	68,136	56,664	796,92	0,9	807	61,87	32500

Analyses chimique de la quatrième campagne (Février 2014)

Vocabulaire

Température:

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux, elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol.

Potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. Il est exprimé par le log décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ .

$$PH = \log 1 / [H^+]$$

L'échelle du PH varie de 0 à 14 :

- Si $[H^+] = [OH^-]$ → Le PH = 7, donc l'eau est neutre.
- Si $[H^+] > [OH^-]$ → Le PH < 7, donc l'eau est acide.
- Si $[H^+] < [OH^-]$ → Le PH > 7, donc l'eau est basique.

Les valeurs mesurées pour l'ensemble des échantillons pendant les deux campagnes montrent que tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme de potabilité avec des valeurs qui varient entre 6,9 et 8.08.

Pour avoir une idée sur l'état d'équilibre de l'eau en comparant le PH d'équilibre au PH mesuré.

Le PH d'équilibre est obtenu graphiquement à partir du diagramme de Schoeller – Berkaloff :

- Si le PH mesuré > PH d'équilibre, l'eau est incrustante.
- Si le PH mesuré < PH d'équilibre, l'eau est agressive.
- Si le PH mesuré = PH d'équilibre, l'eau est neutre.

L'examen des tableaux montre que la majorité des points d'eau pendant les deux campagnes sont caractérisés par une eau agressive.

Conductivité :

C'est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface et séparées l'une de l'autre de 1cm. Elle permet une estimation approchée de la minéralisation des eaux. On sait qu'une eau salée est très conductrice, par contre une eau pure est très résistante.

Elle dépend de la température, la concentration totale et la nature des ions présents dans l'eau.

Oxygène dissout :

L'oxygène est toujours présent dans l'eau, sa solubilité dépend de la température et de la salinité. La teneur en oxygène dans l'eau est fonction de l'origine de l'eau. Les eaux superficielles peuvent en contenir des quantités relativement importantes proches de la saturation, par contre les eaux profondes contiennent que quelques milligrammes par litre (RODIER, 1996). L'O.M.S recommande que les niveaux d'oxygène dissous soient maintenus aussi près que possible de la saturation (pas de valeur guide) (In Ziani D. 2009).