

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département des Sciences de la Terre

N° d'ordre :

Mémoire

Présenté pour l'obtention du grade de Magister en Géologie

Option : hydrogéologie

Thème :

Modélisation hydrogéologique de la plaine de Rémila-Khenchela

Par

STAIFI Leila

Dr. SAFA Aissa

Président

Université d'Oran 2

Pr. MANSOUR Hamidi

Encadreur

Université d'Oran 2

Dr. CHABOUR Nabil

Examineur

Université Constantine 1

Oran, 2017

RESUME

Nos réserves d'eau souterraine sont de plus en plus mises sous pression. Non seulement la recharge est limitée, mais de grandes quantités d'eau souterraine sont aussi pompée comme source d'eau bon marché. Ceci mène d'une part à l'épuisement des réserves précieuses d'eaux souterraines

Le but de ce travail est d'étudier l'hydrogéologie et établir un modèle mathématique de l'une de ces zones semi-arides complexes d'Algérie, le bassin de Remila dans la région de Khenchela ; Cette recherche, qui doivent permettre à terme une exploitation durable des ressources en eaux souterraines. Elle est destinés à prévenir les difficultés risquant d'apparaître notamment en période d'étiage pour les masses d'eau peu profondes comme les aquifères multicouches Ils peuvent également prévenir les éventuels conflits d'usage et assurer une gestion de la ressource.

Les modèles mathématiques en hydrogéologie sont largement utilisés en tant qu'outils de gestion, de prévision, de compréhension du fonctionnement d'un système hydrodynamique complexe et, de façon générale, comme outils d'aide à la décision.

La démarche de représentation théorique simplifiée d'un tel système comporte

- ✚ Rassembler les données nécessaires au début de l'étude afin d'analyser de manière approfondie la situation existante;
- ✚ Elaborer un modèle de base qui est une représentation du modèle de la situation de référence. Le degré du détail de ce modèle est toujours adapté selon son objectif;

- ✚ Calcul du modèle des eaux souterraines de la situation de référence pour un certain nombre de scénarios pertinents;
- ✚ Si des mesures de niveau sont disponibles, effectuer un calibrage du modèle des eaux souterraines sur base des données connues;

Sur base de ce modèle de base, le calcul d'un certain nombre de scénarios de réalisation possibles pour évaluer l'effet de ceux-ci sur les niveaux des eaux souterraines;

SUMMARY

Our underground water supplies are increasingly put under pressure. Not only recharging is limited, but large quantities of groundwater are also pumped as a market good water source. This leads to the exhaustion of the precious reserves of groundwater

The purpose of this work is to study the hydrogeology and establish a mathematical model of one of these complex semi-arid areas of Algeria, deep basin in the Khenchela region; This research, which should allow term sustainable use of groundwater resources. It is intended to prevent problems that might appear especially in low-flow period for shallow water bodies as aquifers multilayer they can also prevent possible conflicts of use and management of the resource.

Mathematical models in hydrogeology are widely used as management tools, prediction, understanding of the functioning of a complex hydrodynamic system and, in General, as the decision aid tools.

Simplified such a system theoretical representation approach includes

- ✚ Collect the necessary data at the beginning of the study to analyse in depth the existing situation;
- ✚ Develop a basic model that is a representation of the baseline model.
The degree of detail of this model is always tailored according to its purpose;
- ✚ Calculation of the model of the groundwater of the reference situation for a number of relevant scenarios;
- ✚ If level measures are available, perform a calibration of the model of groundwater based on known data;

Based on this basic model, the calculation of a certain number of possible implementation scenarios to assess the effect on groundwater level

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude au directeur de ce mémoire, le professeur Mansour Hamidi , pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier spécialement mon professeur Chabour Nabil de l'université de Constantine, qui m'a fournis les outils nécessaires à la réussite de ma mémoire.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi

Je remercie mes frères, et mes sœurs pour leur encouragement

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche. Un grand merci aux personnes travaillons à ANRH Constantine pour les conseils concernant la base de données, ils ont grandement facilité mon travail.

SOMMAIRE

Sommaire

LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	13
INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE I SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE	17
1-SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	18
1-2-Situation de la zone d'étude	18
1-3-Géomorphologie et reliefs	19
1-4-Végétation et réseaux hydrographiques	19
2- GEOLOGIE	21
2-1-CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL	21
2-1-1-Domaine interne	21
2-1-2-Domaine médian ou domaine des flyschs	22
2-1-3-Domaine externe	22
2-2-CADRE GEOLOGIQUE LOCAL	24
2-2-1-La synthèse lithostratigraphique	24
Le Trias	24
Le Crétacé inférieur	25
Le Crétacé supérieur	28
Le Sénonien	29
Le Cénozoïque	29
Le Néogène	29
Quaternaire	31
2-2-2- Les principales phases et structures tectoniques de la région des Bassins et de l'Aurès septentrional	31
2-2-3- Structure et tectonique de la plaine de Rémila – Khenchela	34
2-2-4-Tectonique, analyse des images spatiales et résultat tectonique	35
3-Conclusion	38
CHAPITRE 2 HYDROCLIMATOLOGIE.....	40
1-Introduction	41
2-Cadre climatologie	42
3-Les précipitations	43
4-Les températures	47
5-Notion de bilan d'eaux	49
6-Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	50
7-Le ruissellement et l'infiltration	54
8-Conclusion.....	55
CHAPITRE 3 ETUDE HYDROGEOLOGIQUE GENERAL	56
Apport de la géophysique	57
1-Prospection électrique	57

1-1-Introduction	57
1-2 Travaux effectués	57
1-3-Reconnaissance géologique et analyse des résultats	57
Apport de l'hydrogéologie	59
2-Hydrogéologie de la plaine	60
2-1-Introduction	60
2-2-Lithologie et âge des formations aquifères de la plaine de Remila (wilaya de Khenchela)	63
2-3- Coupes hydrogéologiques	63
2-3-1-Interprétation de la coupe hydrogéologique	65
2-3-2 -Interprétation de la coupe hydrogéologique I et II	65
2-4- Etude de l'écoulement du système aquifère	68
2-4-1- Réseaux de surveillance de la plaine Remila	68
2-5 -Présentation et nature des nappes aquifères	71
2-5-1- Nappe phréatique	71
2-5-2-Nappes profondes	71
2-6- Piézométrie et hydrodynamique	72
2-6-1-Interprétation	73
2-6-2-Type et distribution spatiale des conditions aux limites des aquifères	73
2-6-3- Paramètre hydrodynamique de l'aquifère	74
a-Perméabilité et transmissivité	74
b -La transmissivité T	74
c -La perméabilité K	74
2-7-conclusion	75
Apport de l'hydrochimie	76
1-Introduction.....	76
2-Les eaux de la nappe de la plaine de Rémila	76
2-1-Faciès hydro chimiques, Potabilité et aptitude à l'irrigation	76
2-1-1-Les faciès hydrochimiques	76
2-1-2- Potabilité	80
2-1-3-Aptitude de l'eau à l'irrigation	81
3-Distribution spatiale de paramètres hydro chimiques	83
3-1-Introduction	83
3-2-Distribution spatiale des conductivités électriques	84
3-3-Distribution spatiale des nitrates	86
4- Conclusion.....	87

CHAPITRE 4 SCHEMA CONCEPTUEL, APPROCHE THEORIQUE DES MODELES NUMERIQUE EN HYDROGEOLOGIE ET ORGANISATION DES DONNEES.....	88
1-Approche théorique des modèles numériques en hydrogéologie.....	89
1-1-Généralités sur les modèles	89
1-2- Les étapes de l'élaboration d'un modèle	90
2- Méthodologie des modèles numériques en hydrogéologie	91
2-1- Formulation mathématique	91
2-2- Méthode de résolution	93
2-3- Conditions initiales et aux limites	96
2-3-1- Conditions initiales	96
2-3-2 - Conditions aux limites	96
2-Conceptualisation du schéma structurel et fonctionnel du système aquifère de la plaine de Rémila Application du progiciel MODFLOW.....	98
2-1- Discrétisation du domaine	98
2-2- Données prises en compte	99
2-3- Etude de la recharge des aquifères par les pluies efficaces	99
2-5- Construction et calage du modèle	99
2-5-1- Construction du modèle (description, choix du maillage et Discrétisation des espaces aquifères. Saisie des données numériques relatives	100
A-la géométrie	100
B - Aux types de limites	100
C -Aux paramètres hydrodynamiques	101
2-5-2- Calage du modèle	102
2-5-2-1- En régime permanent	102
2-5-3- Sensibilité du modèle	104
CHAPITRE 5 LES PROGRAMMES DE DEVLOPEMENT ET MOBILISATION DE LA RESSOUC	106
1-Introduction	107
2- Formulation des scénarios de recharge	107
3- Bilan des aquifères selon différents scénarios d'exploitation des aquifères	107
3-1-Analyse des bilans globaux simulés de la nappe selon les scénarios de recharge	107
3-2- Analyse des bilans globaux simulés de la nappe selon l'effet de pompage.....	108
4- Proposition de programme de gestion et de protection de la ressource hydrique Souterraine	110
CONCLUSION GENERALE.....	112
BIBLIOGRAPFHIE	116
SITES INTERNET	119
ANNEXE	120

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure-1 : Localisation géographique de la nappe de la plaine Rémila –Khenchela.....	18
Figure-2 : Réseau hydrographique dans le bassin de Gareat El-Tarf.....	20
Figure-3 : Carte géologie de l’Algérie orientale et de la Tunisie septentrionale (D’après Wildi1983)	23
Figure-4 : Coupe interprétative dans le bassin de Rémila d’après Vila(1977)	24
Figure-5: Schéma géologique de la région des Sebkhass et de l’Aurès septentrion.....	27
Figure-6: Carte de fracturation de la région de Sebkhass	36
Figure-7: Carte cosmo tectonique de la région des sebkhass	38
Figure-8: Evolution des ressources en eau par habitant dans les pays de Sud et de l’Est de la Méditerranée entre 2000 et 2050 (D’après le Plan Bleu)	41
Figure-9: Carte pluviométrique de l’Est l’Algérie, établie d’après A.N.R.H., 1993	44
Figure-10: Situation des stations pluviométriques et hydrométriques (d’après Carte ANRH –2002et limite de la zone d’étude plaine de Remila	45
Figure-11: Précipitations moyennes mensuelles (Période 1999-2014)	46
Figure-12 : Précipitations moyennes interannuelles (Période1999-2014)	46
Figure-13 : Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Hamma (1999/2014)	47
Figure-14 : Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Boulheilette (1999/2014)	48
Figure-15 : Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Yabou (1999/2014)	48
Figure-16:Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Ain Mimoun MF (1999/2014)	49
Figure-17 : Variations des éléments du bilan hydrique mensuelle moyen des 4 stations Période (1999-2014)	53
Figure-18 : carte des grandes ligne structurales et tectonique du substratum antéquatenaire	59
Figure-19 : Position stratigraphique des principales formations aquifères de la région de Khenchela	61
Figure-20 : profils des coupes hydrogéologiques	64
Figure-21 : Coupe hydrogéologique (D’après la coupe géologique de J.M. VILA)	65
Figure-22 : coupes1-1 coupe hydrogéologiqueII des forages (Z3,Z9,Z5,Z6,Z18) Source ANRH 1979	66
Figure-23 : les coupes 2-2 coupe hydrogéologique II des forages (Z1,Z4,Z7,Z8,Z11) (source ANRH 1979)	67
Figure-24 : réseau de surveillance actuel de la plaine de Remila-Khenchela	68
Figure -25 : Evolution de niveau statique dans les piézomètres (haute eau).....	69
Figure-26 : Evolution de niveau statique dans les piézomètres (base eau)	70
Figure-27 : carte d'inventaire des points d'eaux Juin 2000	72
Figure-28 : cartes piézométrique Juin2000	73
Figure -29 : carte de distribution spatiale des transmissivité	75

Figure-30 : diagramme de piper pour les eaux souterraines de la plaine de Remila-Khenchela	78
Figure-31 : diagramme de piper pour les eaux souterraines de la plaine de Remila-Khenchela	78
Figure-32 : diagramme de piper pour les eaux souterraines de la plaine de Remila-Khenchela	78
Figure-33 : digramme de Scheller et Berkaloff	79
Figure -34 : diagramme de Scheller et Berkaloff	79
Figure -35 : diagramme de Scheller etBerkaloff	80
Figure -36 : diagramme de Scheller etBerkaloff	80
Figure-37 : Diagramme de détermination de la qualité des eaux d'irrigation	83
Figure-38 : carte de distribution spatiale des conductivités électriques	85
Figure-39 : carte de distribution spatiale des nitrates	86
Figure -40 : discrétisation de la plaine de Remila Khenchela	98
Figure -41 : les conditions aux limites de la nappe de la plaine Rémila –Khenchela	100
Figure -42 : perméabilité de la nappe de la plaine Rémila –Khenchela	101
Figure-43 : La piézométrie simulée en régime permanent (nappe de la plaine Rémila –Khenchela)	102
Figure-44 : La droite des moindres carrées obtenue en régime permanent (Rémila).....	103
Figure-45 : La droite des moindres carrées obtenue en régime permanent sous l'effet de la recharge (nappe de la plaine Remila-Khenchela	104

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau N°01: les coordonnées géographiques des stations (Période 1999-2014).....	44
Tableau N°2: Températures moyennes mensuelles à la station d'El Hamma (1999/2014)	47
Tableau N 3: Températures moyennes mensuelles à la station Boulheilette (1999/2014)	48
Tableau N4 : Températures moyennes mensuelles à la station Yabou (1999/2014).....	48
Tableau N°05: Températures moyennes mensuelles à la station Ain Mimoun MF (1999/2014)	49
Tableau N06: Bilan hydrique à la station d'El Hamma (1999/2014)	50
Tableau N07: Bilan hydrique à la station Boulheilette (1999/2014)	51
Tableau N08 : Bilan hydrique à la station Yabou (1999/2014).....	51
Tableau N09 : Bilan hydrique à la station Ain Mimoun MF (1999/2014)	52
Tableau N10 : Bilans hydriques mensuelle des 4 stations de la zone d'étude	53
Tableaux N°11 bilan hydrologique infiltration est ruissèlement des 4 stations	55
Tableau N°12 : LES FORMATIONS AQUIFERES AU NIVEAU DE LA REGION DE KHENCHELA	61
Tableaux N°13 piézométrie de la plaine de Remila-Khenchela basse eaux	69
Tableaux N° 14 piézomètres de la plaine de Remila-Khenchela Haute eaux	70
Tableau N°15: Représentation de Piper des eaux souterraines de la plaine de Remila..	77
Tableau N°16: Tableau représentatif de la qualité et de la Potabilité de l'eau.....	81
Tableau N°17: Bilans globeaux simulés de la nappe de la plaine de Remilla. Régime permanent.....	108
Tableau N°18 : Bilans globeaux simulés de la nappe de la plaine de Remilla. Régime permanent minimiser le débit de pompage des forages d'eau.....	109

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La nouvelle politique de l'Algérie en matière de mobilisation, de transfert et de gestion des ressources en eau, veut créer une dynamique de rééquilibrage de développement local du territoire national. Les efforts considérables de mobilisation des ressources en eau atteindront à plus ou moins long terme leurs limites, tant physiques qu'économiques. Il faut donc maîtriser la demande, alléger la pression sur la ressource, et aller vers une gestion durable de ces ressources. L'économie d'eau et le recyclage restent des actions à privilégier dans un système de gestion de la demande

Les premières conclusions qui se dégagent après plusieurs années d'exploitation des nappes sont surtout liées aux problèmes de gestion, de planification et de suivi de la ressource en eau. Il est difficile également de gérer une ressource sur un territoire aussi vaste sans un modèle mathématique de gestion. Dans ce cadre, plusieurs modèles ont été élaborés. L'élaboration de cet outil indispensable a permis surtout de prévoir à moyen et long terme l'évolution de la nappe en fonction des prélèvements proposés, ainsi que les conséquences de son utilisation

L'objet de cette étude est de réaliser un modèle mathématique d'une plaine qui se trouve dans un bassin endoréique qui présente deux grands problèmes en matière de Ressource en eaux : la faiblesse des précipitations et la déperdition des eaux au niveau des Chotts.

Démarche :

Ce travail est subdivisé en cinq parties :

La première partie

Elle est consacrée à l'étude – (Aire d'extension, cadre hydro climatologique et géologique) de la zone d'étude

La deuxième partie

II / Etude hydrogéologique

II-1/Prospection électrique.

II-2/Identification de la typologie des nappes aquifères de la plaine de Remila.

II-3/Etablissement de l'état piézométrique de la nappe aquifère, analyse de son évolution spatio-temporelle

II-4/Type et distribution spatiale des conditions aux limites des aquifères

II-5/Identification, évaluation et distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques des aquifères.

II-6 /apport hydrochimique : distribution spatiale de la qualité des eaux souterraines.

La troisième partie :

Conceptualisation du schéma structurel et fonctionnel des systèmes aquifères de la plaine de Remila.

- ✚ Discrétisation du domaine.
- ✚ Données prises en compte.
- ✚ Construction du modèle (description, choix du maillage et discrétisation d'espaces aquifères. Saisie des données numériques relatives.
- ✚ Calage du modèle.
- ✚ Simulation des scénarios d'exploitation.
- ✚ Critique et limites du modèle numérique de la nappe aquifère de la plaine de Rémila.

La quatrième partie

Bilan des aquifères selon différents scénarios d'exploitation des aquifères.

- ✚ Analyse des bilans globaux simulés de la nappe selon les scénarios de recharge.
- ✚ Analyse des effets de pompage sur la piézométrie.
- ✚ Proposition de programme de gestion et de protection de la ressource hydrique souterraine.

CHAPITRE I
SITUATION
GEOGRAPHIQUE ET
GEOLOGIQUE

1- SITUATION GEOGRAPHIQUE

1-2- Situation de la zone d'étude

La plaine de Remila est limitée au Nord par la série d'axe anticlinaux ENE-OSO, des Dj. Bou Arif, Dj. Fedjoudj et Dj. Tarf, alors qu'à l'ouest elle est limitée par le bassin Miocène de Timgad (figure-1). L'Est et au Sud on trouve respectivement l'unité : Oum El Bouaghi – Aïn Beïda et les Monts des Aurès.

La nappe couvre une superficie de 1988 km² appartient au bassin versant des hauts plateaux constantinois.

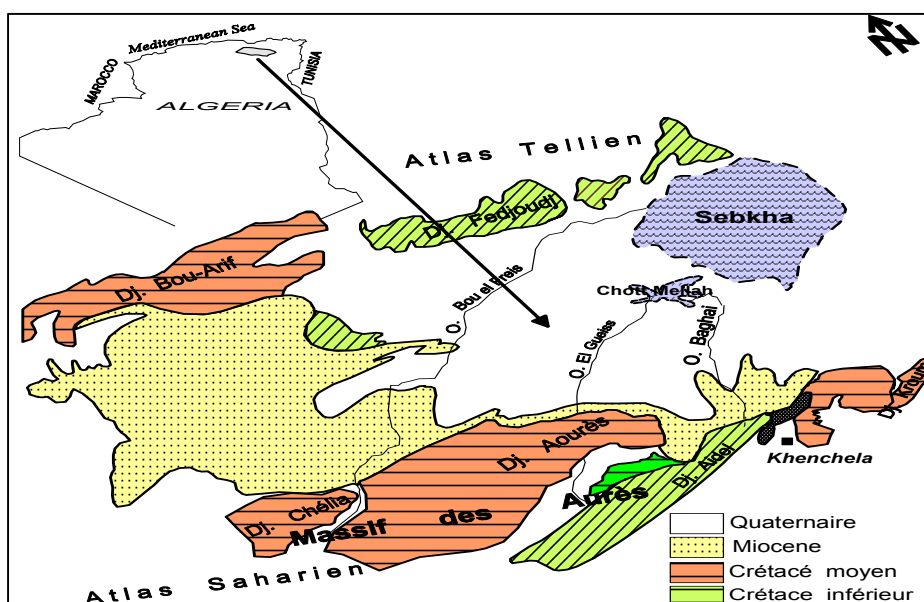


Figure -1 : Localisation géographique de la nappe de la plaine Rémila –Khenchela.

Les ressources en eau exploitables du bassin de Gareat El Tarf sont presque exclusivement souterraines. Elles sont contenues dans des réservoirs présentant des caractéristiques hydrodynamiques généralement complexes et variables. Ces réservoirs assurent l'alimentation en eau potable ainsi que les besoins agricoles et industriels des communes incluses dans le bassin.

1-3- Géomorphologie et reliefs

La dépression endoréique de la plaine très étendue et relativement élevée présente une altitude moyenne de 900 m les massifs qui l'encadrent 1200m culminent à 2300 m au sommet de l'Aures (Djebel Chelia). La zone basse a une altitude de 830m et présente dans sa partie orientale, une zone de saumures de près de 200 km, la Sebkha de Garaat-et-Taraf.

La géomorphologie du site est caractérisée par une topographie au sol plane sur l'ensemble de la plaine. Les bordures Sud et Nord du bassin sont marquées par des inclinaisons relativement importantes, conséquence d'une activité tectonique ayant affecté ces régions, permet un écoulement superficiel plus important.

Le massif des Aurès est la barrière montagneuse qui, prolongeant les hauts plateaux de l'Atlas, marque brutalement sur sa surface sud, la zone saharienne grâce à sa haute position. L'Aurès présente des conditions climatiques favorables à l'accumulation des eaux superficielles et souterraines. Il s'élève au milieu de deux bassins de l'Algérie orientale, le bassin des hauts plateaux constantinois et le bassin de chott Melghir il constitue leur ligne de partage des eaux.

➤ Végétation et réseau hydrographique

La végétation dans les plaines et les plateaux de basse altitude est de type steppique très clairsemé, En altitude, la région est boisée surtout de belles et de vastes forêts constituées essentiellement de chênes verts, pins d'Alep, genévriers, ifs, certains conifères avec, à partir de 1500m, une cédraie sur Djebel Aoures et Djebel Faraoun (Ouled Yagoub et Ouled Oudjana)

La population est d'environ 60 000 habitants concentrés généralement au niveau des communes et des mechtas.

L'industrie est quasi absente, on trouve celle du bois, des minoteries, et des unités de collecte et de transformation de lait.

➤ Réseau hydrographique (figure -2)

Oued Boulfreis et quelques affluents mineurs drainent l'essentiel de notre région d'étude. Il prend sa source au pied du massif de Chelia. L'écoulement est quasi-pérenne avec un débit moyen de 22hm³ ; Oued Gueiss, prend sa source au pied de Djebel Auras, draine le sous-bassin d'EL-Gueiss selon un axe d'écoulement **SW-NE** et termine son parcours dans les chotts (figure-2) l'écoulement est intermittent avec un apport de 12Hm³ sont stockés par le barrage en amont de la plaine.

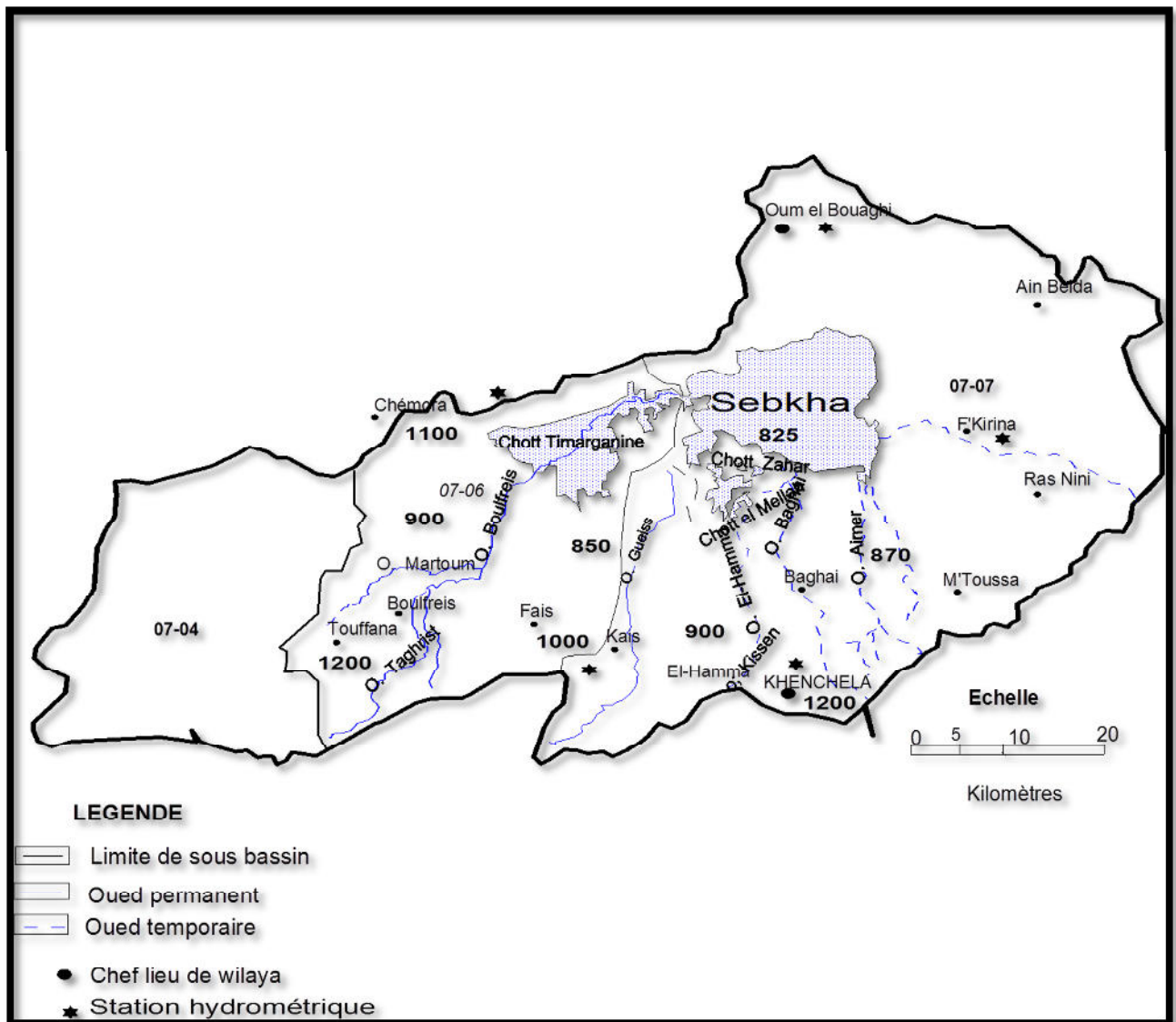


Figure -2 : Réseau hydrographique dans le bassin de Gareat El-Tarf

2- GEOLOGIE

La plaine de Rémila-Khenchela forme une vaste dépression de 50 à 60 km de long sur 20 km de large en moyenne, comblée de dépôts moi-plio-quaternaires.

Les massifs qui l'encadrent sont essentiellement Crétacés, les formations s'étagent du Crétacé moyen (Aptien) au Crétacé supérieur (Cénomaniens, Turonien, Sénonien).

Grossièrement, le bassin est constitué de deux structures synclinales parallèles orientées Est-Ouest, séparées par la structure anticlinale du Djebel Amrane, dont le prolongement vers l'Est est enfoui sous le recouvrement récent.

Sur le flanc sud du bassin, la série Crétacée est la plus complète : Sénonien, Turonien, Cénomaniens.

Dans le synclinal sud est venu se déposer le Miocène marin marno gérseux (Burdugalien) en discordance sur le Crétacé, et les marnes rouges du Pontien.

L'ensemble est partiellement recouvert par les dépôts quaternaires d'épaisseur variable. La plaine est occupée à l'Est par un chott de près de 200 km² le, Garaet Et Tarf, où l'alluvionnement est encore intense et qui draine l'ensemble de la plaine.

2-1- Cadre géologie régional

Pour mieux comprendre l'histoire géologique de la région d'étude, il paraît indispensable de la situer dans son contexte géologique régional ; c'est-à-dire dans le cadre des chaînes côtières d'Afrique du Nord,

La chaîne alpine d'Algérie orientale est constituée par la superposition de plusieurs types de séries définissables en général du trias au miocène.

Les grands ensembles structuraux se subdivisent en trois grandes familles qu'on peut distinguer du Nord vers le Sud et qui sont respectivement d'origine interne, médiane et externe

2-1-1-Domaine interne

En Algérie orientale, il est représenté par un chapelet de massifs côtiers bordés au Sud par la dorsale Kabyle et au Nord par le socle Kabyle (Figure-3).

❖ **Socle Kabyle** il affleure en grande partie la Kabylie, entre Jijel et Skikda, dans les pointements côtiers des massif d'Algérie, du Chénoua et de Ténès.

La dorsale Kabyle (ou chaîne calcaire) en Algérie, elle affleure au Sud d'Annaba (Djebel Labiod) d'où on peut la suivre d'une manière continue jusqu'au Nord de Constantine (Kef Sidi Driss). Elle est localisée à la bordure méridionale du socle Kabyle et se caractérise par une sédimentation carbonatée d'où son nom de chaîne calcaire.

2-1-2-Domaine médian ou domaine des flyschs

Deux grands types de flyschs ont été distingués avec au Nord les flyschs mauritaniens et au Sud les flyschs massyliens et numidiens (Figure- 3), déposés durant le Crétacé et le Paléogène.

2-1-3-Domaine externe

En Algérie orientale, le domaine externe est représenté par les séries suivantes (Figure-3) :

1- Les séries Telliennes

Les formations Telliennes ont été découpées en trois grandes entités, dont les limites suivent à peu près les lignes paléogéographiques (J. M. VILA, 1980).

- ✓ Les unités ultra-telliennes.
- ✓ Les unités telliennes Sensu stricto.
- ✓ Les unités péni-telliennes.

2- Les avant pays allochtones

- ✓ L'unité sud Sétifienne.
- ✓ L'unité néritique constantinoise.
- ✓ L'unité du type Sellaoua

3- L'avant- pays Autochtones

Il est caractérisé par des séries sédimentaires mésozoïques épaisses, très plissées localisées au niveau de : l'Atlas tunisien, l'Atlas saharien, les monts du Hodna, les monts de Batna et les massifs de l'Aurès

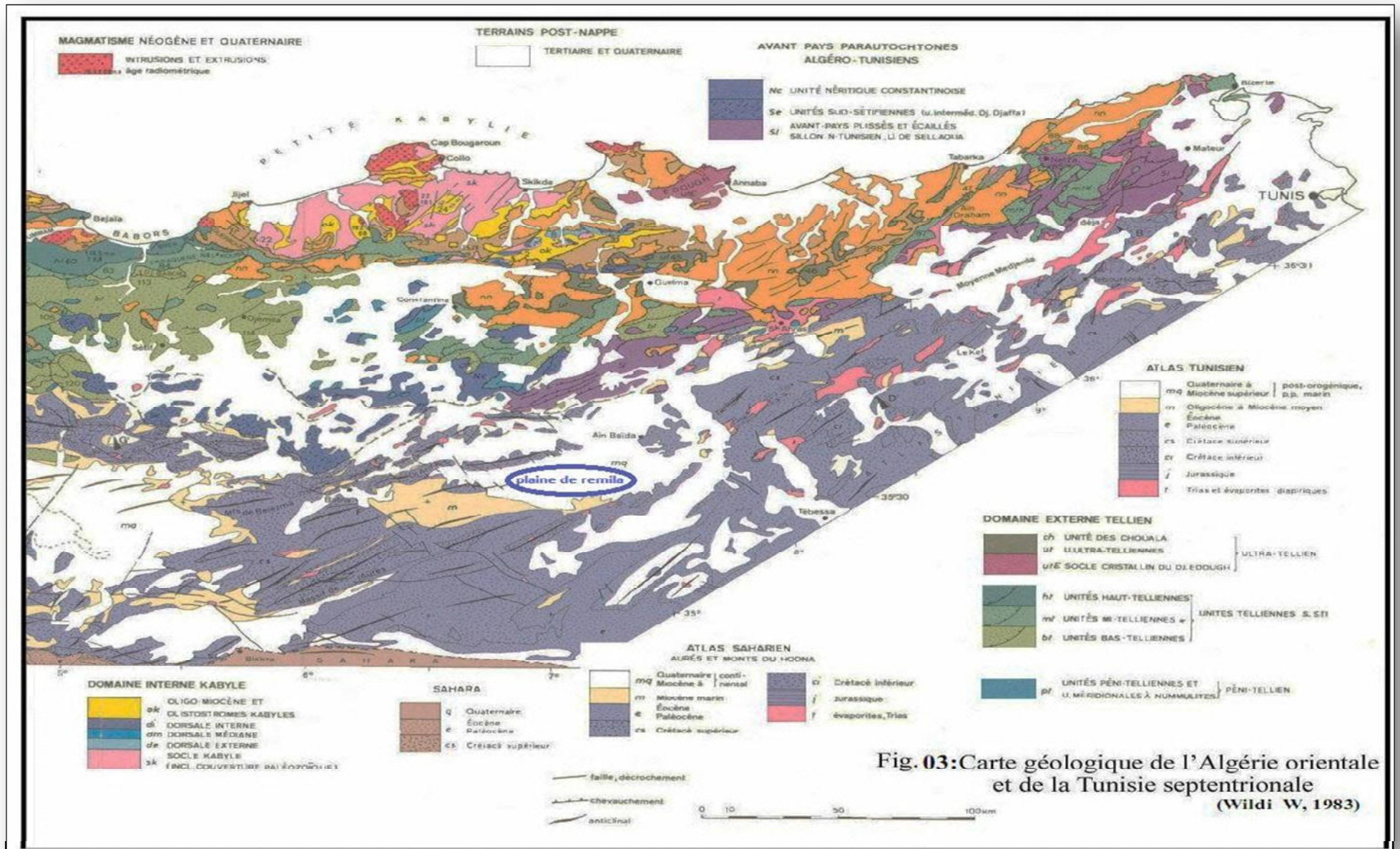


Fig. 03: Carte géologique de l'Algérie orientale et de la Tunisie septentrionale (Wildi W, 1983)

2-2 Cadre Géologie local

Nos connaissances géologiques sur la région d'étude sont largement inspirées des travaux et études régionaux et des synthèses sur le massif des Aurès, sur les hautes plaines steppiques et sur les zones humides. La plupart de ces études ont été axées sur les caractères stratigraphiques, géomorphologiques, sédimentologique et structurales (R. Laffitte 1939, R. Guiraud 1973, C.G.G. 1969, J. M. Vila 1977, B. Houha 1996 et 2007).

2-2-1- La synthèse litho stratigraphique

- Le Trias

Ce dernier est principalement terrigène et forme une diagonale allant de Batna à Oum El Bouaghi. Il jalonne plus ou moins directement de grandes zones d'accidents. (Para-autochtones).

Les affleurements les plus significatifs dans la zone d'étude (figure -4) :

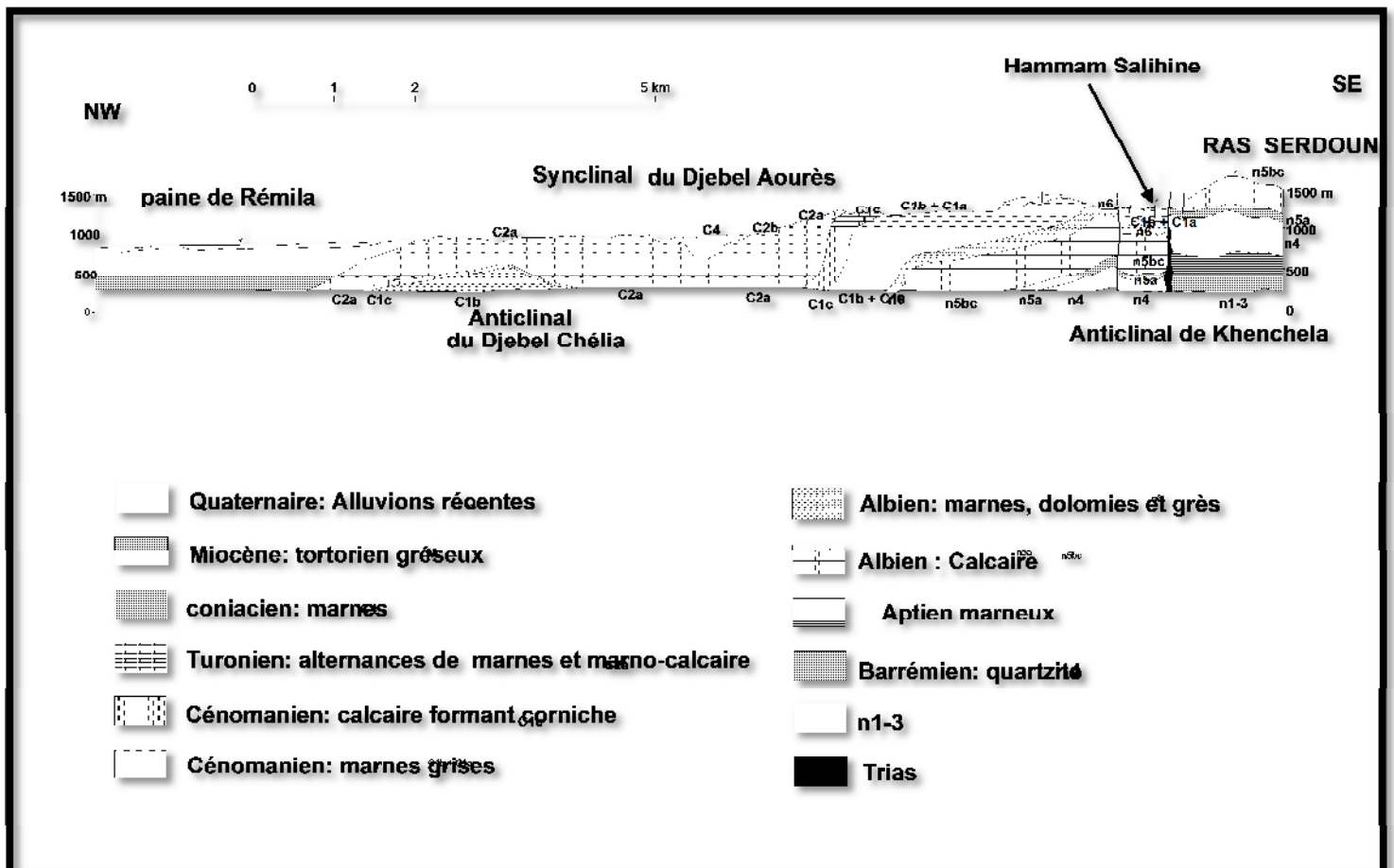


Figure-4 : Coupe interprétative dans le bassin de Remila-Khenchela d'après Vila (1977)

Il existe un pointement de Trias, très localisé à proximité de Khenchela, où il isole le miocène du crétacé, suivant une bande de 4 à 5 km de long et de 300 à 400 m de large. Il présente les faciès classiques : marnes bariolées, gypse, cargneules brèches.

Elles constituent les roches les plus abondantes à l'affleurement.

Le gypse est le plus fréquent, en amas saccharoïdes blanc grisâtre, durs, ou sous forme de grands cristaux (Laffitte, 1939 et Vila, 1977).

L'abondance du sel caractérise cet affleurement, visible dans les diapirs de Khenchela

Et Krouma, mais cela tient, non pas à un caractère original particulier au trias de cette région, mais au fait que ce pointement étant récent (post-miocène), le sel n'a pas eu le temps d'être Dissous, tandis que dans les autres pointements, qui sont anté-miocènes, il a disparu depuis longtemps (R. Laffitte 1939).

- Crétacé inférieur

La répartition des affleurements du crétacé basal jurassique est limitée, comme pour le trias, aux zones où l'intensité conjuguée de la tectonique et de l'érosion permet aux structures d'apparaître à la surface

Le barrémo-aptien

Le barrémien et l'aptien constituent la majeure partie des affleurements. C'est cet ensemble qui détermine l'ossature des principaux axes montagneux.

✓ Le Djebel Bou Arif

Tous les auteurs qui ont travaillé sur le Bou Arif (Guellal S., et al 1973b) (Guiraud R., 1973), (Marmi R., 1995), s'accordent sur l'hétérogénéité des caractères sédimentaires de ses séries. De la base au sommet, on observe la succession suivante :

- ✓ Grès massifs blancs à stratifications obliques et entrecroisées, et à plages ferrugineuses.
- ✓ Micrites finement gréseuses, blanchâtres, noduleuses parfois en plaquettes, passant rapidement à des micrites grises à débris de mollusques.
- ✓ Elles sont suivies de dolo-micrites et de dolomies surmontées par des dolomies brunes, massives et métriques.
- ✓ Grès massifs, blancs, métriques s'achèvent par des grès fins argilo-carbonatés

Ferrugineux. Guellal S. parle d'une surface ferrugineuse à pistes de vers lithophages au toit de ce dernier niveau de grès blanc. Cette surface marquerait la séparation des grès barrémiens et la série marneuse attribuée à l'aptien inférieur (azoïque).

On note cependant, au plan lithologique, une coupure qui apparaît à la faveur d'un niveau bréchique, lenticulaire, centimétrique à éléments polygéniques et avec développement de grès. Si vers l'ouest (Hodna), la série albienne présente des lacunes sédimentaires, Guiraud R., (1973) et Bureau D., (1986), vers l'Est de Djebel Bou Arif, cette discontinuité est soulignée par une surface fortement ferrugineuse (hard-ground).

L'albien est représenté par une série de 200 m de grés argileux à dolomies devenant vers le haut, marneuse. C'est le prélude de la transgression céno-mano-turonienne.

Le massif de Bou Arif cet anticlinal présente de nombreuses particularités morphologiques et structurales :

L'évolution en méga-blocs et de ce massif impressionnant est confirmée, failles et zone de failles limitent ces blocs et méga blocs.

- La partie axiale(cœur)de cet anticlinal est essentiellement barrémo-aptienne.
- Les deux terminaisons péri-anticlinales présentent des différences.

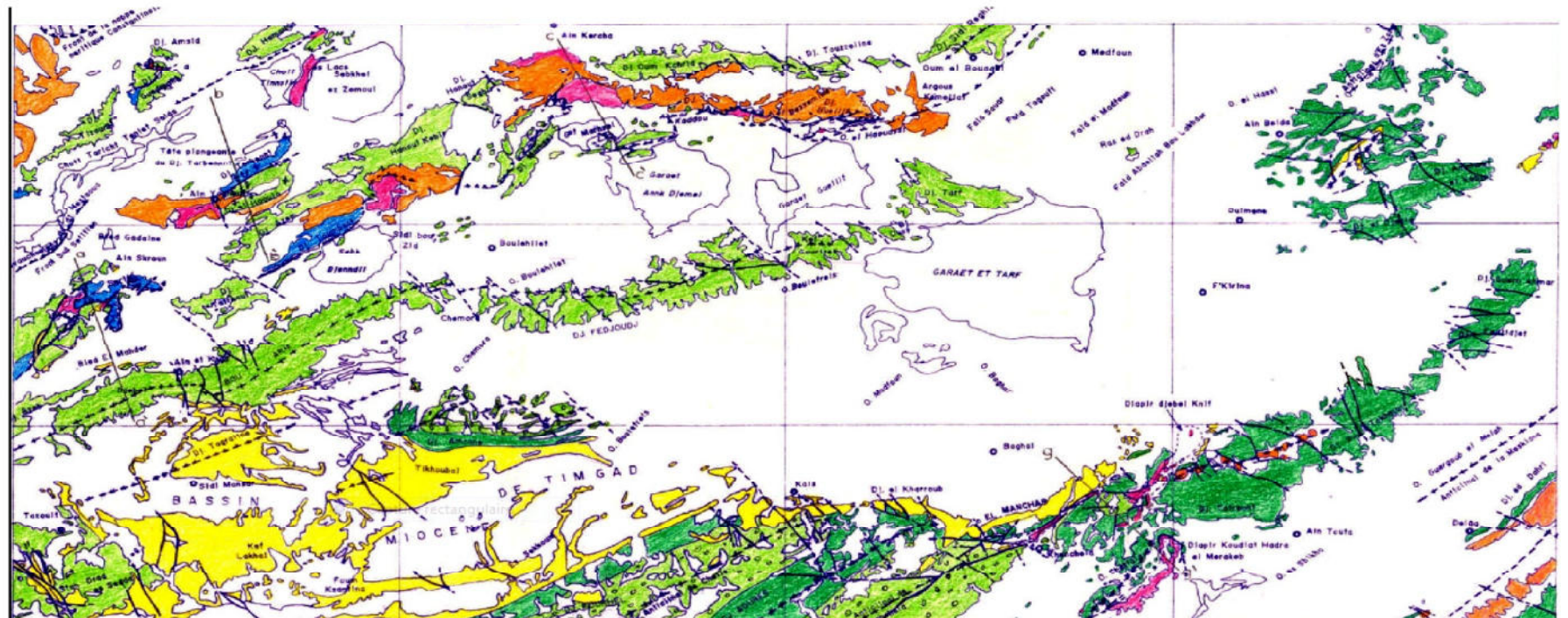
La terminaison SW présente un ennoyage rapide et important grâce à une série de failles actives et à composante normale.le dénivelé est de 250 m.

La terminaison NE est progressive, présentant plusieurs paliers, la dénivellation est importante : de 1597 m (Ras Lakhel) on passe à 850m à Chemora.

Autres particularités : La morphologie des formations aptiennes de Kat Sraf à Teniet Fourhel.

- Basculement de Kat Sraf à Ras Bebach.
- Effondrement au niveau de Djebel Akhral
- Replat structural à Teniet Fourhel.
- La zone effondrée correspond à une zone de torsion où l'axe de l'anticlinal de Bou-Arif change de direction.

Figure-5: shéma géologique de la région des Sebkhias et de l'Aures septentrional



Légende

	Chevauchement et chevauchement
	Axe synclinal
	Axe anticlinal
	Contact normal
	Front de la zone maritime de l'Aures
	Front de la zone maritime Sababghienne
	Sédiments
	Mésocène
	Crétacé
	Crétacé supérieur
	Crétacé inférieur et moyen
	Tertiaire

Assemblages douze cartes géologiques 1/50000



- Le crétacé supérieur

Le Cénomano-Turonien

Le cénomanien et le turonien se développent essentiellement dans la partie méridionale et orientale.

Le Djebel Amrane est un pli anticlinal de la couverture méridionale du crétacé inférieur de Djebel Fedjoudj et forme la terminaison Est-Sud-Est de Dj Bou-Arif. Djebel Amrane est situé en fait, au milieu du bassin néogène de Timgad.

Le Cénomanien moyen et supérieur (350 m) forment respectivement le cœur de cet anticlinal. Cet étage dont la base n'est pas visible est composé :

✚ d'une séquence de marnes grises à marno-calcaires gris-blanchâtre (150 m).

A la base de ce segment affleurent, au niveau du periclinal ouest, des marnes gris jaunâtres et une bio-microsparite ferrugineuse d'aspect lumachellique à échinodermes et Lamellibranches. Les marnes sous-jacentes ont fourni une microfaune du cénomanien moyen.

✚ d'une séquence de marnes grise, parfois gris verdâtre, à plaquettes centimétriques lumachelliques à lamellibranches, à échinodermes intercalées de biomicrites argileuses, généralement ocre, noduleux (150 m environ).

✚ D'une séquence de biomicrites argileuses à patine blanchâtre et à cassure gris-noir, se débitant en feuillets millimétriques et s'enrichissant vers le haut de petits passés marneux (35 m).

✚ Une bio-micrite (0.60 m) ferrugineuse, à nodules pyriteux termine le cénomanien. Cet horizon constitue un niveau repère du toit de cet étage.

✚ Le Turonien est représenté par des marnes gris-bleuté à micrites gris-blanchâtre à toit riche en débris de lamellibranches et d'oursins. Celles-ci se terminent par des biomicrites, ocres lumachelliques à huîtres noduleuses à la base (120 m).

✚ Une alternance de marnes gris-beige et de biomicrites argileuses grises, souvent lumachellique, devenant ocre vers le haut (220 m environ).

✚ La limite supérieure du Turonien n'a pu être datée par manque d'étude à cet effet.

Le turonien de Djebel Amrane est constitué essentiellement d'une formation de 330 m où les biomicrites souvent lumachelliques à tests mollusques sont surtout développés dans la partie moyenne et sommitale de cet étage.

- Le Sénonien

Du fait de l'importance de l'érosion antérieure au dépôt du miocène marin, le sénonien affleure de façon irrégulière et on ne le trouve qu'au Sud de la plaine de Remila, sur le flanc nord de l'anticlinal du Djebel Chélia avec un faciès principalement marneux. Son épaisseur peut être très importante et atteindre 1000 à 2000 m.

- Le Cénozoïque

La répartition des terrains cénozoïques est irrégulière, et ceux-ci sont moins étendus Comparativement aux terrains secondaires.

L'absence ou la rareté de certains étages tels que le paléocène, éocène inférieur, l'oligocène et miocène inférieur auraient pour origine des manifestations tectoniques successives suivies de cycles d'érosions intenses.

- Le Néogène

Dans les zones SW ; les terrains rencontrés au-dessus de celles de l'éocène inférieur sont d'âge miocène. Ces derniers sont surtout développés dans le bassin de Timgad qui s'étend de Batna à Khenchela.

Ils reposent en discordance sur des séries plus anciennes. Vers l'ouest, le miocène ceinture le Djebel Bou Arif et le Djebel Amrane.

Au nord-est, ces Djebels constituent de faibles reliefs et les formations mio-pliocènes Disparaissent rapidement sous les dépôts quaternaires de Garaet Et Taref. Enfin, au sud ces séries forment une frange continue sur la bordure septentrionale du massif aurésien. du point de vue lithologique, la série miocène peut être subdivisée en trois formations bien distinctes: une formation continentale rouge à poudingues, une formation marine à niveaux bio-micritiques et gréseux et une formation continentale parfois rouge, argilo-gréseuse

Miocène

✓ **Miocène inférieur Burdigalien**

Le Miocène inférieur est marin et transgressif. Les dépôts éocènes étant absents à l'ouest de Khenchela, les formations miocènes sont déposés en discordance sur le crétacé supérieur. Une coupe du miocène marin, relevée par M. Lafite à Ain Meriel dans la région de Lambèse , a donné: Poudingue à ciment calcaire –3 –5 m.- Calcaire à lithothamniées –10 m. Alternance de marnes gréseuses et de grès à pectinidés –250 m. Marnes gréseuses ,couches rouges (continentales) .

Dans la plaine étudiée, située, plus à l'Est, il y a quelques variations à cette stratigraphie. Dans le Djebel Amrane, le calcaire à lithothamniées a disparu et les marnes gréseuses et grès reposent directement sur le conglomérat de base.

Il convient de préciser que ces formations miocènes marines, classées fréquemment sous le terme de « grès», ne comportent en réalité que quelques bancs de grès noyés dans une importante épaisseur de marnes gréseuses. Ces marnes gréseuses, généralement verdâtres ou gris –bleu, comportent elles –mêmes des sables très fins et du silt, et forment une roche de compacité moyenne, se débitant en plaquettes après séjour à l'air. Ce qui fait que ces marnes gréseuses, paraissant très friables à l'affleurement, constituent en réalité une roche assez dure et probablement peu perméable. L'épaisseur de cette série marine semble varier de 200 à 400 m sur la bordure sud de la plaine.

Les affleurements ne sont connus qu'au sud du bassin, jusqu'au Djebel Amrane. Il est probable qu'en profondeur, l'extension de ces dépôts soit limitée au prolongement de cet anticlinal sous la plaine. Ceci serait corroboré par les forages de Kais 1, Bir Bou Saha, Sonda qui ont atteint le substratum crétacé sans traverser le miocène marin.

✓ **Miocène supérieur et Pliocène**

Pontien

Les formations du miocène marin ont été recouvertes par un important dépôt continental d'argiles rouges gypseuses. Après le stade marin, terminé avec la transgression marine du

Burdigalien – Helvétien, le Tortonien a vu s’installer une ère de sédimentation continentale qui ne devait pas être très différente de la sédimentation récente à proximité des Garaat . Ces dépôts sont sensiblement concordants sur les séries marines et occupent la majeure partie des dépressions péri - aurasiennes. La série la plus complète a été relevée à sidi – Mançar (Laveran) à l’Ouest de Timgad : argiles rouges à gypse en concordance sur le miocène marin –300 à 400 m sables et graviers avec ciment argileux –300 m.

Dans la partie orientale du bassin, c’est –à- dire dans la plaine de Remila, seule reste la première phase de la sédimentation, à savoir les argiles maintenues en relief au- dessus de la plaine. L’épaisseur des argiles rouges dans le bassin étudié est variable, elle serait liée à une reprise par l’érosion dans le bassin à partir de la fin du pliocène, érosion qui se poursuit actuellement. Ces formations qui ont 300 à 400 m d’épaisseur à Timgad semblent s’amincir vers l’Est en direction de Khenchela.

- Quaternaire :

Les dépôts quaternaires ont recouvert la majeure partie de la plaine et du bassin de la Gareat. Nous sommes en présence d’un bassin fermé qui a recueilli tous les produits de l’érosion des reliefs environnants. Ces dépôts sont très variés et leur nature est liée à la fois aux conditions climatiques et à la nature des formations anti-quaternaires. Toutefois la sédimentation est en majeure partie argileuse et marneuse, avec une proportion importante de gypse.

On y trouve cependant des intercalations de graviers et sables et même des poudingues peu épais, qui correspondent vraisemblablement à des stades d’érosion maximum ou à des lits d’oueds fossiles. Enfin, notons que dans la partie sud de la plaine, en bordure de l’Aurès, une croûte calcaire blanche recouvre les différentes formations, et le plus souvent le poudingue surmontant les couches rouges.

2-2-2 Les principales phases et structures tectoniques de la région des Bassins et de l’Aurès septentrional

Etablies chronologiquement, les différentes phases tectoniques majeures ayant affecté la région des Bassins et de l’Aurès septentrional d’étude, caractérisent l’ensemble des

déformations qui se sont succédées au cours de la période du crétacé au plio–quaternaire, de la phase la plus ancienne à la phase récente

➤ **La phase anté-aptienne**

Cette phase est marquée localement au Djebel M'zouzia, à l'est de Meskiana, par un faciès brechiforme, d'âge gargasien, dont les éléments appartiennent au trias.

➤ **La phase aptienne**

Cette phase, remarquablement localisée, s'identifie vraisemblablement à une manifestation de rejeux verticaux d'anciens accidents du socle.

Durant l'aptien inférieur, elle a provoqué des montées diapiriques dont la plus ancienne a développé un récif allongé, suivant une direction générale N 20° - 26° E.

➤ **La phase emsherienne**

Cette compression N–S d'âge Sénonien est à l'origine du plissement E–W et de la réactivation d'anciennes failles normales N 45° - 60°E en décrochement et failles inverses (Vila J.M., 1973).

Ce plissement E–W est associé à la mise en place des surfaces d'émergence se manifestant par des dépôts bréchiques, Djebels Knif et Krouma, dont la plupart des éléments ont été empruntés aux formations triasiques.

Ces dépôts témoignent ainsi de mouvements locaux de faibles amplitudes ayant été amorcés en avance, apparemment sur l'orogénèse de la fin du lutétien.

Ceci nous permet de constater que par endroit, le diapirisme semble s'effectuer d'une manière presque continue par cascades ascensionnelles à la faveur de zones de faiblesses liées à des pressions tectoniques. Ces dépôts récifaux se développent suivant une direction N 20°E à N-S (Knif, Chettaia).

➤ **La phase post lutétienne, anté-burdigalienne**

Cette phase orogénique a été étudiée par Savornin (1920) et Laffitte (1939). Elle s'est déclenchée dès le lutétien supérieur comme l'attestent les dépôts laguno –continentaux et conglomératiques rouges.

Mais son paroxysme est apparu au cours de l'oligocène et du miocène basal – Aquitano-burdigalien et cette phase a affecté l'ensemble de l'Algérie du Nord.

La dite phase plisse et déforme profondément les Aurès selon une direction générale N45°E. Elle engendre des anticlinaux droits étroits à axes allongés, suivis de synclinaux à fond large, mais aussi un style cassant par l'intermédiaire de failles directionnelles à déplacement vertical. Enfin la reactivation par celle-ci et l'amplification d'anciens accidents sont accompagnées de nouvelles montées triasiques à orientation N 45°E tel le Djebel El Krouma. L'ensemble de la région, au miocène, subit la transgression de la fin du burdigalien (Langhien –Serravalien) juste après un mouvement positif relativement important, repoussant de la sorte la mer vers le Nord en faisant émerger des endroits considérables représentés par des dépôts gréseux discordants sur le miocène et le crétacé.

Les dépôts de marnes et d'argiles gypsifères du tortonien, témoignent d'un retour hésitant de La mer mais sans discordance apparente, ne dépassant pas le nord des Aurès.

➤ **La phase alpine**

Cette phase est à l'origine d'un raccourcissement N-S d'environ 250 Km (Vila J.M., 1980) d'âge post tortonien. Elle est responsable de la transformation du pli droit monophasé en pli coffré, du style jurassien, souvent bi-axe influencé toujours par la direction N 45°E. Elle a cependant imprimé une direction intermédiaire N 60° - 70°E.

Cette période est aussi matérialisée par l'existence de faisceaux de failles délimitant des compartiments d'orientation générale N80° - 90°E, relayés par ceux de direction N 45° - 50°E ; créant ainsi le style en « baïonnette ».

Les failles résultantes sont décrochantes, régulièrement dextre de direction N120° - 140°E (Vila J.M., 1980).

Des mouvements épi-orogéniques portent enfin le miocène à des altitudes élevées : Djebel El Kelàa à 1620m et Ras Kodalène à 1850 m. Par ailleurs, ces mouvements accentuent les grands accidents N 45°E à remontées du Trias dans les diapirs pré-existants.

➤ La phase plio–quaternaire

C'est une tectonique biphasée, formée par la succession de deux épisodes de déformations : une distension N150°E et une compression N140°E.

✚ La distension est à l'origine des fossés NE–SW à remplissage mio–pliocène. Elle est associée à un système de failles normales dextres N45°E et des failles normales N70°E.

✚ Par contre la compression N 140°E , plus discrète, reliée au régime de la contrainte Actuelle, est marquée par des plis N 70°E et des failles réactivées dont la genès semble plus ancienne.

Parmi ces accidents, il faut noter particulièrement des failles inverses de direction N60° –70°E et d'autres inverses décrochantes N120°E. Marmi R., (1995) a parle de terrains pliocènes affectés par des failles normales et d'autres décrochantes senestres N-S, au Djebel Chebka. Ces failles découpent et décalent des axes de Petits plis orientés N100-110°E.

2-2-3 Structure et tectonique de la plaine de Rémila – Khenchela

La phase de plissements maximum dans l'Aurès débute à la fin du lutétien ; ils correspondent aux mouvements de l'orogénèse pyrénéenne. La mise en place des diapirs triasiques date de cette époque. La seconde phase de mouvement qui intéresse la région se situe après la transgression burdigalienne. Certaines parties du massif s'élèvent, d'autres s'affaissent. C'est dans celles – ci que se déposent les couches rouges, jusqu'à la fin du pontien.

Les mouvements post-burdigalens ont modifié notablement les formations miocènes marines et continentales. Ainsi les grès burdigaliens en bordure Sud de la plaine sont relevés à 60 - 80 m entre Timgad et Kais et à 20-50 m à l'est de Kais. Ils présentent au sud –ouest de la plaine une allure synclinale entre le flanc Sud et le Djebel Amrane. La direction générale est - ouest est d'autre part coupée par des accidents orthogonaux.

L'anticlinal crétacé du Djebel Amrane, qui divise la plaine en deux synclinaux, présente des pendages assez élevés, atteignant 50°. Sa prolongation vers l'est, sous le recouvrement récent, est très vraisemblable, puisque les forages qui se situent au centre du bassin, à 10 km au minimum à l'est de la terminaison du Djebel Amrane, ont rencontré le crétacé à des profondeurs très faibles

2-2-4 TECTONIQUE, ANALYSE DES IMAGES SPATIALES ET RESULTATS

TECTONIQUE

L'approche reste simple et peu conventionnelle. Elle fait appel à cet effet à peu d'artifice. La première étape consiste à relever tous les accidents cartographiés par l'équipe de la Sonatrach (Guellal S et al 1973b). C'est en fait une nouvelle carte de fracturation qui est obtenue (**Figure-6**), à partir de douze cartes étudiées. Sur cette carte, on a reporté tous les affleurements triasiques. La deuxième étape est l'interprétation du document obtenu; c'est-à-dire analyse du réseau d'accidents des différents massifs dans un cadre régional. Pour cela, on a construit des rosaces de fréquences et des rosaces de longueurs, afin de mieux mettre en évidence la densité, l'orientation et la fréquence des fractures.

Il s'agit en fait d'une caractérisation des deux mille accidents recensés par leurs positions dans un plan (x, y), par leur angle avec le nord (ϕ) et par leur longueur (L).

Ces accidents sont triés par angle (ϕ) croissant de 0° à 180° . Le fichier étant divisé en classes de 10° . Pour chaque classe on compte le nombre de fractures et on calcule les longueurs cumulées de tous les accidents de la classe.

On aboutira de la sorte à des représentations en rosaces de fréquences et de longueurs cumulées.

La cartographie géologique de Djebel Fedjouj formant la continuité nord du Djebel Bou Arif montre une structure anticlinale avec de belles terminaisons périclinales simples. Le réseau dense d'accidents la parcourant est cependant plus complexe. On pourrait, en effet, partager le Djebel Fedjoudj en trois parties

- ✚ La partie occidentale où les accidents de direction $N130^\circ-150^\circ$ E prédominent.
- ✚ La partie centrale où l'on note un changement brutal dans la direction des failles.

Une structure de direction N-S aurait contribué à ce changement. Au nord, les formations quaternaires de Garaet Annk Djemel ne permettent pas de suivre cette structure pourtant bien visible au niveau de Djebel Ank Djemel et au SE de Garaet Marhsel.

- ✚ La partie orientale, avec une famille de direction $N50-70^\circ$, pratiquement parallèle à la direction de l'axe du Djebel Fedjoudj, prédomine.

Le Djebel Amrane présente un réseau de fractures denses et complexes dominées par la présence d'accidents E-W.

Malgré la faible fréquence de ces accidents E-W, leur étendue reste importante. Quant à leur cinématique, elle est la même « décrochement dextre avec composante inverse »

➤ **APPORT DES IMAGES SPATIALES**

Les images spatiales utilisées sont d'origine russe de type multi-spectral et appartiennent à la collection « Ressources ». Leur échelle est de 1 /180 000.

Leur interprétation repose sur les mêmes principes que celles des photographies aériennes. Elle a abouti à la réalisation, d'un document cartographique (**figure-6**).



Figure-6: carte de fracturation de la région de Sebka

En effet, l'analyse détaillée des images satellites a permis, d'une part de dessiner un système complexe de linéaments, et d'autre part de fournir des renseignements complémentaires pour comprendre et définir le cadre structural.

L'analyse de la carte cosmotectonique a permis de noter les observations suivantes :

Le Djebel Bou Arif est traversé par une multitude de linéaments tectoniques NW-SE et E-W. Le plus souvent ces linéaments sont accompagnés de mouvements de coulissages, de torsions d'axe, de disparitions de niveaux géologiques et de changements dans la valeur du pendage.

- L'allure en échelons des linéaments E-W mérite d'être relevée, car on la retrouve d'une part au Fedjoudj et d'autre part, elle semble jouer un grand rôle dans l'évolution de ces structures.
- La partie orientale du Fedjoudj se distingue par la torsion due à un grand linéament EW, causée probablement par l'effet d'un faisceau de linéament N-S qui va jusqu'à Oum Kechrid limitant Garaet Guellif dans sa partie occidentale.
- La limite orientale de Garaet Tarf est bloquée par un faisceau de linéaments de direction générale N-S. Si, à l'est immédiat de la Garaat, on n'observe qu'un seul linéament, par contre vers le Sud et parallèlement à Oued Aissour (lui-même de direction N-S) et à l'Est de Khenchela c'est une série d'au moins trois linéaments parallèles et en relais qui sont visibles. Ces linéaments sont perturbés par un linéament de direction N65° E. A l'ouest de Djebel Bou Tokhma, une série de linéaments de direction N-S semble avoir un prolongement important vers le nord, jusqu'à Ain Edda en passant par Djebel Djazia. Et enfin, les observations au niveau de Djebel Guern Ahmar montrent que la terminaison Nord de ce dernier est liée à la présence d'un grand linéament E-W. Cet accident se prolonge jusqu'à Garaet Tarf. Les déformations tectoniques le long de ce linéament ont permis d'établir aisément

sacinétique de décrochement dextre



Figure -7: carte cosmo tectonique de la région des sebkhas

3- Conclusion

Sur le secteur étudié, le Crétacé inférieur s'est déposé sous forme de calcaires marneux, de marne, de calcaire gréseux et des calcaires compacts. L'Aptien affleure au Djebel Fedjoudj, au Nord du bassin. Dans l'ensemble du massif du Fedjoudj, les faciès gréseux sont donc très réduits et il y a prédominance de calcaires néritiques à Orbitolines et de dolomies. L'Albien existe dans les anticlinaux des Aurès, mais n'affleure pas au Nord dans la chaîne du Djebel Fedjoudj. Dans l'Aurès, il présente souvent un faciès gréseux, marneux et dolomitique il devient franchement marneux.

Au Sud du bassin, l'Albien est représenté sur la bordure de l'Anticlinal de Khenchela (Djebel Aidel).

Le Tertiaire est constitué d'argiles rouges gypseuses et repose directement, en discordance, sur le Crétacé. Cette formation est composée de marnes gréseuses et grès reposent directement sur le conglomérat de base. Il convient de préciser que ces formations Miocènes marines, classées fréquemment sous le terme de « grès », ne comportent en réalité que quelques bancs de grès noyés dans une importante épaisseur de marnes gréseuses. Ce qui fait que ces marnes gréseuses, paraissant très friables à l'affleurement, constituent en réalité une roche assez dure et probablement peu perméable. L'épaisseur de cette série marine semble varier de 200 à 400 m sur la bordure Sud de la plaine.

Les affleurements ne sont connus qu'au Sud du bassin, jusqu'au Djebel Amrane. Il est probable qu'en profondeur, l'extension de ces dépôts soit limitée au prolongement de cet anticlinal sous la plaine.

Les formations quaternaires sont particulièrement bien développées dans les régions comprises entre les reliefs crétacés des monts des Aurès au sud et la dépression centrale du bassin de Rémila, établie principalement sur le Néogène.

Les formations anciennes sont constituées par des alternances de conglomérats et de sables surmontés par des sédiments fins argilo sableux, rouge au sommet desquels apparaît une croûte calcaire blanche.

Des alluvions récentes constituent montre que la sédimentation est en majeure partie argileuse et marneuse, avec une proportion importante de gypse et présente un maximum d'épaisseur au centre de la plaine et au voisinage du Chott.

CHAPITRE 2

Hydro-climatologie de la plaine de Rémila – Khenchel

1-Introduction

Les évolutions de températures et de précipitations décrites par les modèles climatiques entraîneront une aggravation de ces tendances. Les régions méditerranéennes, qui souffrent déjà d'un stress hydrique important aggravé par une succession d'années de sécheresse, vont se trouver particulièrement exposées à des réductions de leurs ressources en eau. Dans certains pays, ce type d'évolution pourrait déboucher sur des situations de crise aiguë. Au sud et à l'est de la Méditerranée, compte tenu de la croissance démographique et des conséquences immédiates des modifications du cycle de l'eau, on estime qu'à l'horizon 2050, environ 290 millions de personnes pourraient se retrouver en situation de pénurie d'eau (figure-8).

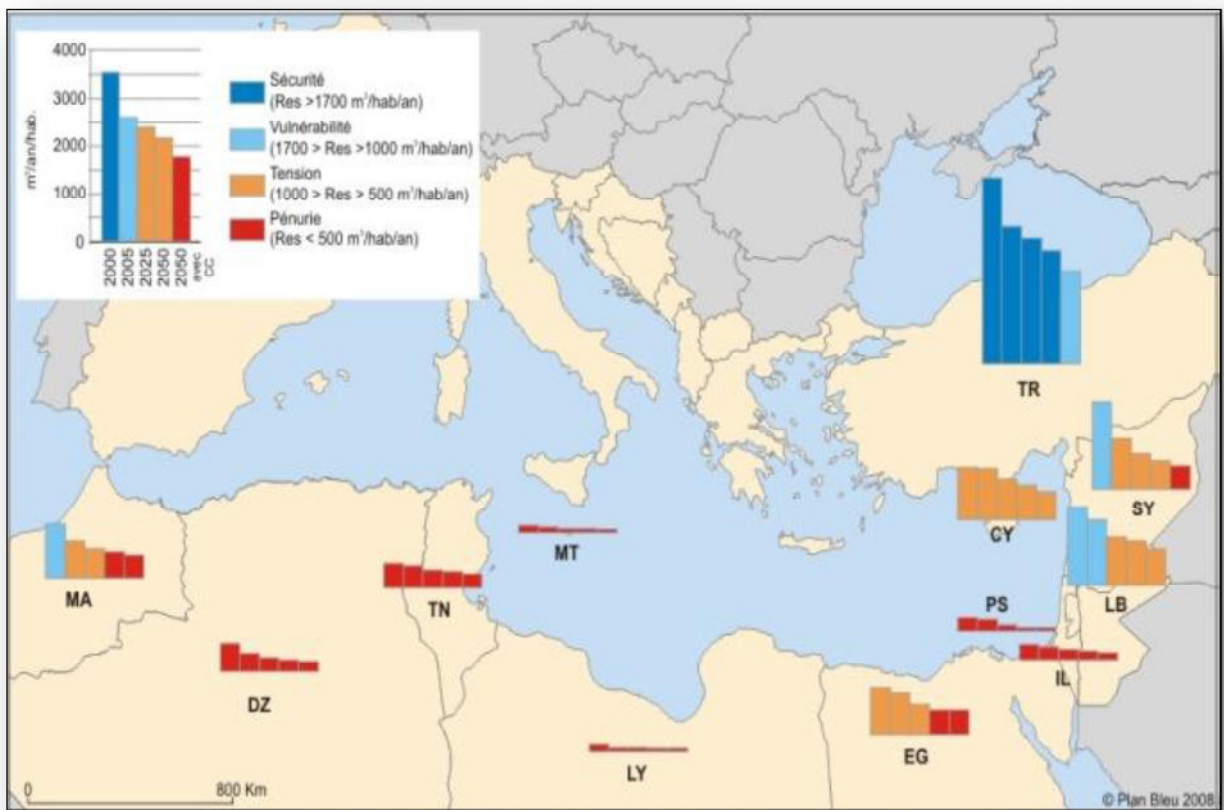


Figure-8: Evolution des ressources en eau par habitant dans les pays de Sud et de l'Est de la Méditerranée entre 2000 et 2050 (D'après le Plan Bleu)

La question des impacts est une question complexe confrontant les grandes tendances en matière de températures, précipitations et niveau de la mer, avec les caractéristiques naturelles et anthropiques de la Méditerranée. L'environnement naturel méditerranéen est d'ores et déjà fortement marqué par les pressions des sociétés qui s'y développent, pressions que les effets du changement climatique vont exacerber. Ainsi, les impacts les plus importants du changement climatique en Méditerranée sont à rechercher du côté de la disponibilité en eau, de la biodiversité et des activités économiques qui en dépendent.

2- Cadre climatologique

A l'instar de toute l'Algérie, le milieu physique de l'Est a pour principale caractéristique l'ordonnement du relief en éléments longitudinaux quasiment parallèles.

De la mer à l'intérieur se succèdent : le Tell maritime (montagnes surplombant la Méditerranée et plaines côtières), le Tell intérieur (montagnes, collines et bassins intérieurs), les Hautes Plaines (grandes étendues de hautes terres, fermées à l'ouest par la diagonale des Monts du Hodna), l'Atlas Saharien (massifs de l'Aurès – Nememcha et du Hodna) et enfin le Piémont saharien (jusqu'au Chott Melhir, limite Sud de notre zone d'étude).

L'organisation orographique de l'Algérie orientale est, plus qu'ailleurs, affectée d'un fort gradient latitudinal qui concerne aussi bien les altitudes topographiques que les étages bioclimatiques (Côte M., 1996a). Cet édifice est complété, sur le plan géologique, par une variété d'unités structurales.

Le climat fort contrasté y imprime sa plus grande marque. Latitude et continentalité donnent lieu à une disposition en bandes zonales est-ouest de la pluviométrie et de l'évapotranspiration. Aussi, la présence de grands « châteaux d'eau » sur le Tell et le littoral, directement exposés aux flux humides dominants du Nord et du Nord-Ouest, s'oppose-t-elle à une sécheresse marquée à l'intérieur.

La nature et la répartition du couvert végétal sont, de manière générale, commandées par ce compartimentage physico-climatique.

La région d'étude se situe dans les hautes plaines constantinoises ; ce sont de vastes étendues planes, compartimentées en une série de bassins individualisés, plus ou moins délimités par des horsts calcaires. Elles sont topographiquement perchées par rapport aux plaines littorales ou sahariennes, mais toujours dominées par les chaînes Nord et Sud. Le réseau hydrographique méditerranéen mord largement sur les Hautes Plaines, dans leurs marges nord, et surtout aux extrémités Est (Oued Medjerda) et Ouest (Oued Boussellam).

Les zones de faiblesse du centre sont jalonnées par un chapelet de chotts, sebkhas et garaet, où viennent se jeter les oueds dévalant du piémont Nord de l'Atlas Saharien. Dans cette « gouttière des Hautes Plaines » la marque de l'endoréisme est nette tant s'y conjuguent topographie de cuvette et semi-aridité du climat (Côte M., 1996a). Le Chott Hodna, plus décalé vers le Sud-Ouest, se trouve géographiquement dans le prolongement de la région inter-atlasique algéro-Oranaise

Le bilan hydrologique de la région se trouve-t-il directement influencé par les nuances du climat, plus spécialement par deux paramètres déterminants : pluviométrie (conditionnant l'alimentation en eau des rivières) et évaporométrie (pertes ou retour de l'eau à l'atmosphère).

La connaissance du bilan hydrique conditionne celle des ressources en eaux souterraines dont dépend en grande partie l'alimentation des aquifères. Le bilan et notamment la recharge des nappes est établi à partir des valeurs des paramètres hydro climatiques du bassin versant étudié. Dans le cas présent une synthèse de ces éléments tels la pluie et la température mensuelles, a été intégrée dans le modèle de Thorntwait pour en déduire l'infiltration efficace dans la zone de Rémila –Khenchela.

Le bilan hydrique de la nappe de Rémila est estimé par la méthode de Thorntwait. La pluviométrie mensuelle est la moyenne calculée sur une période d'observation de 18 ans (1999-2014)

3-Les précipitations

Schématiquement, les précipitations décroissent du littoral vers l'intérieur suivant un fort gradient latitudinal, altéré néanmoins par l'effet orographique de l'Atlas saharien, avant de s'accroître à nouveau dans le Piémont saharien où les pluies se raréfient

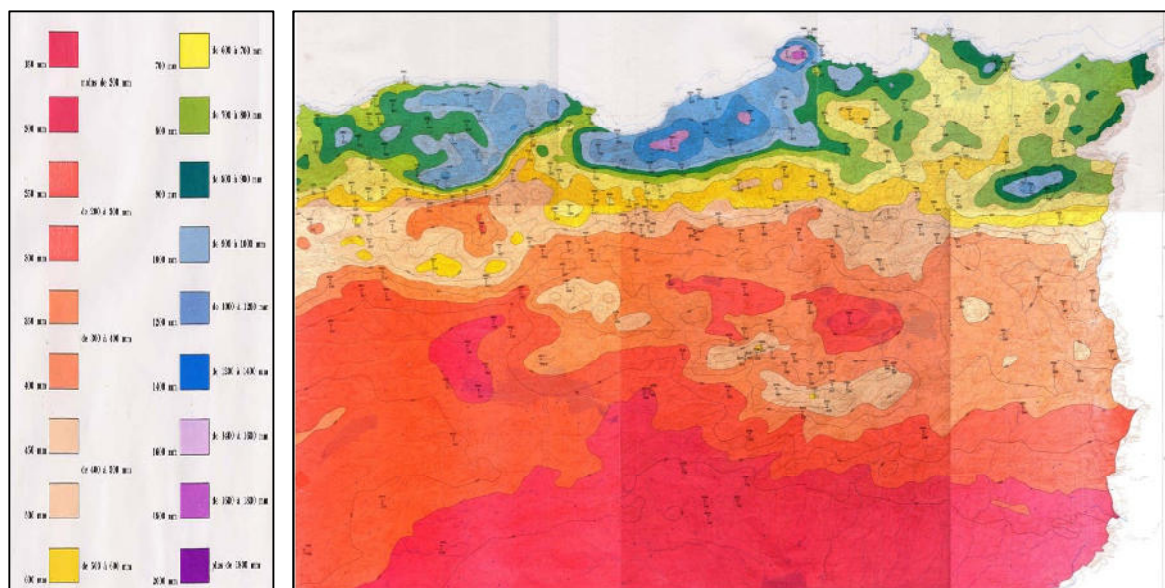


Figure-9: carte pluviométrique de l'Est l'Algérie (A.N.R.H., 1993) : 1921 - 1960

Les Hautes Plaines sont nettement cernées dans leur bordure Nord par l'isohyète 500 (mm). La pluviométrie décroît vers la bordure Sud (350 mm) avec des creux assez nets (moins de 300 voire moins de 200 mm) dans la zone des lacs salés (figure -9) .

L'analyse hydroclimatique du bassin à l'étude est effectuée à travers les données de la Période 1999-2014, recueillies aux stations citées dans le tableau N°01

Tableau N°01 : Les coordonnées géographiques des stations période (1999-2014)

Localisation	X (km)	Y (km)	Z (m)	Observation
station (061803): BOUHMAMA	867	228,5	1140	Fonctionnelle
Station (061815) : EL HABADA	905,5	234	1120	Fonctionnelle
Station (070409) : TIMGAD	841,75	250,9	1000	Fonctionnelle
Station (070502): BOULHILET	858,4	277,55	859	Fonctionnelle
station (070604): YABOUS	858,45	239,65	1200	Fonctionnelle
station(070605) : TOUFANA	856,1	249,75	1040	Fonctionnelle
station(070606) : CHELIA CPR	858,85	237,1	1260	Fonctionnelle
station(070704): AIN MIMOUN M.F	886,35	243,6	1180	Fonctionnelle
station (070707) : AIN BEIDA	924,15	288	1004	Fonctionnelle
station (120201): MESKIANA	949,7	271	845	Fonctionnelle
station (120202): AIN DHALAA	940,85	250,4	980	Fonctionnelle
station (140103): BERRICHE	921,85	300,5	800	Fonctionnelle
station (140109): AIN BABOUCHE	905	303,1	860	Fonctionnelle
station(070705):EL HAMMA	897,609	249,789	928,5	Fonctionnelle

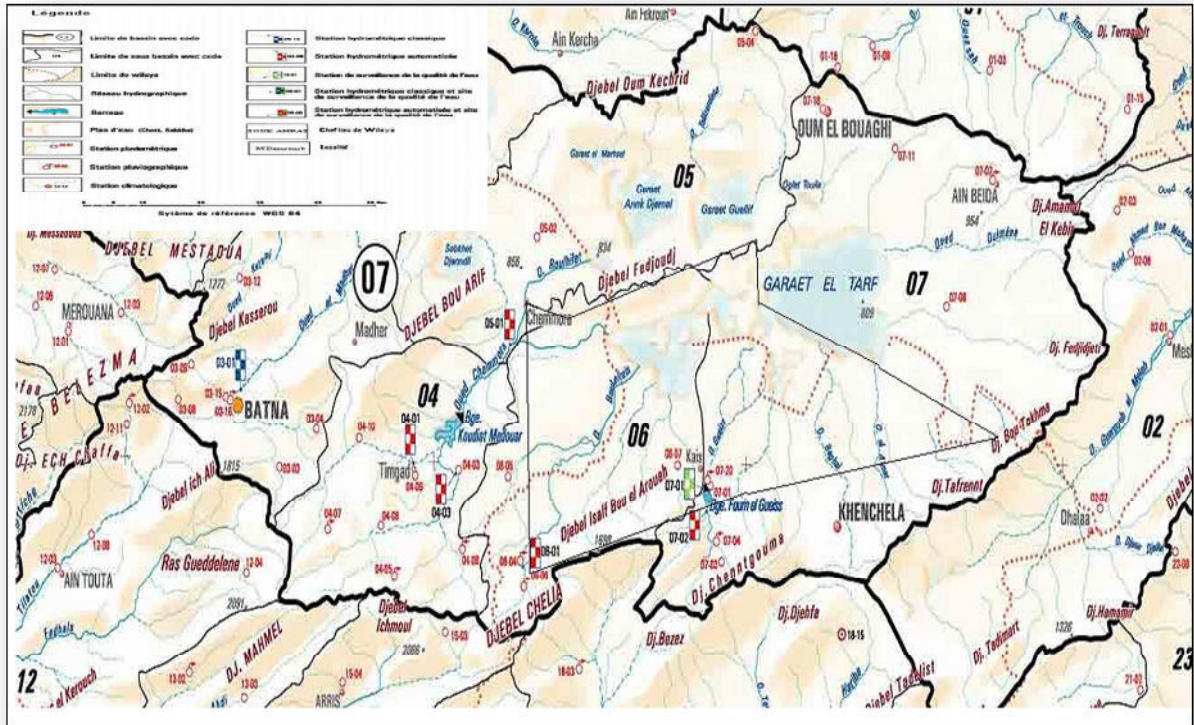


Figure-10: Situation des stations pluviométriques et hydrométriques (ANRH –2002) et limite de la zone d'étude plaine de Remila

3-1-Pluies moyennes mensuelles

La représentation en histogramme des précipitations moyennes mensuelles des 14 stations (figure-11), montre une hétérogénéité importante des précipitations d'un mois à l'autre, le mois le plus arrosé a une valeur maximale supérieure à 70 mm au mois de novembre et 60 mm pour le mois de septembre ; et un minimum inférieur à 20 mm au mois de Juillet et de 30 mm mois de juin

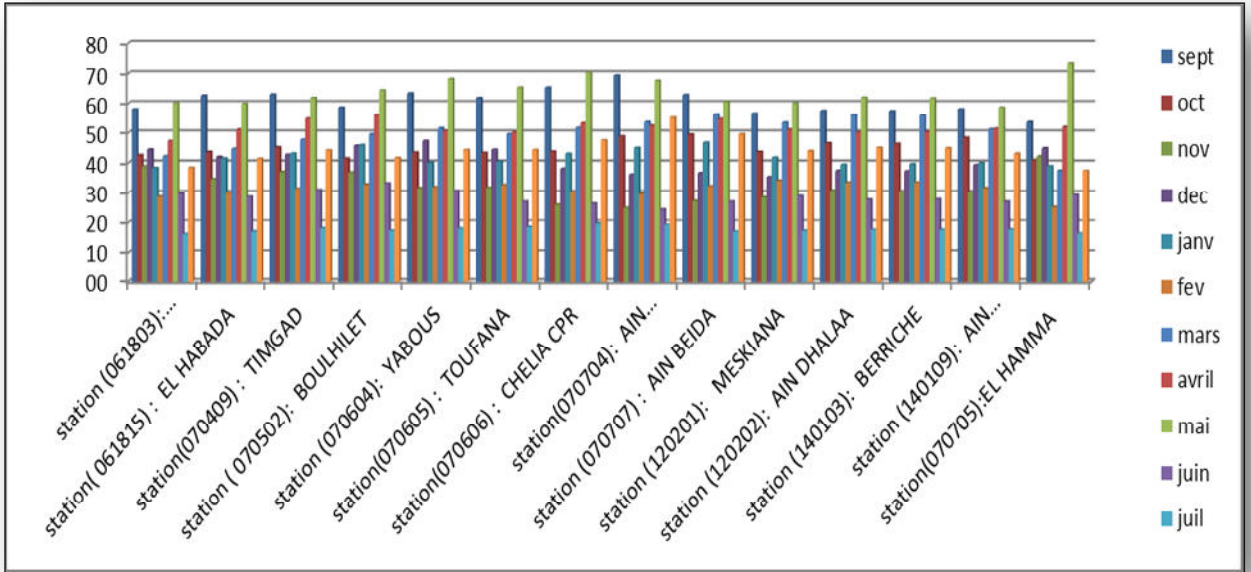
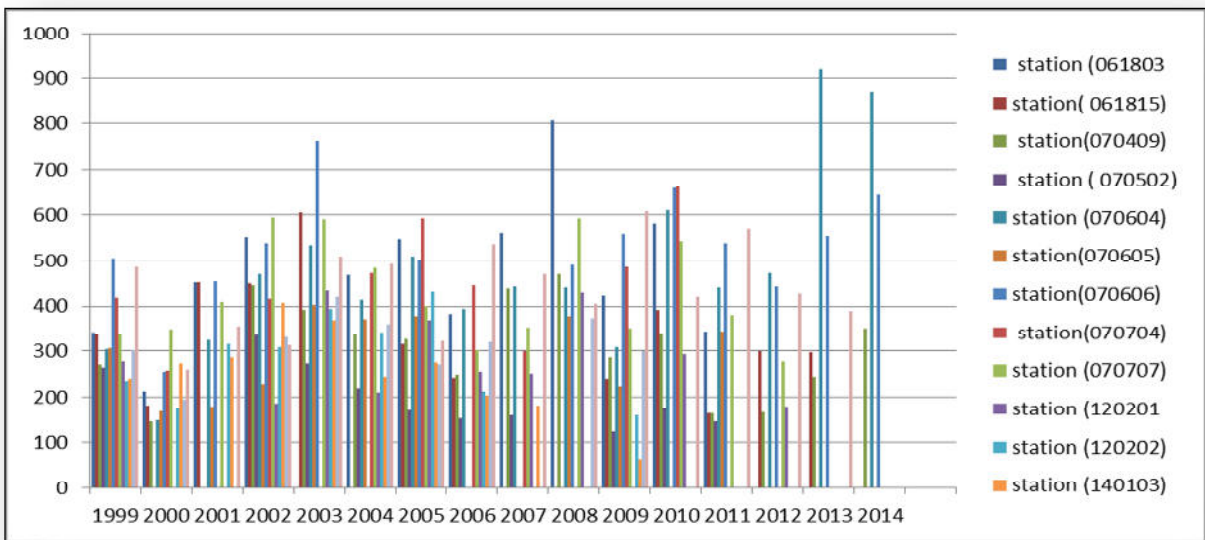


Figure-11 : Précipitations moyennes mensuelles (Période 1999-2014)

3-2-Pluies moyennes annuelles

L’histogramme des précipitations moyennes annuelles (Figure-12) fait ressortir une nette répartition pluviométrique zonale. En effet, à travers la visualisation graphique des précipitations relevées aux quatorze sites, il est aisé de constater que la zone sud-ouest de la plaine de Remila se démarque des autres sites par une pluviométrie plus élevée : 900 mm durant les deux dernières années, comme le montre la station de Yabou (070604) et Chelia (070606) se trouvant au piémont du Djbel Chelia

Figure-12 : Précipitations moyennes interannuelles (Période 1999-2014)



4-Les températures

La température est un facteur très important dans l'évolution du déficit d'écoulement qui entre dans l'estimation hydrologique. Ce paramètre est indispensable à la climatologie vu le pouvoir évaporateur qu'il exerce sur les surfaces mouillées, et qu'il est à l'origine du bon fonctionnement du cycle de l'eau (figure -13).

L'analyse des températures est basée sur la cartographie des températures moyennes mensuelles de l'Algérie réalisé par A.N.R.H. Année 2002. C'est un outil supplémentaire offre l'avantage de connaître en tout point de l'espace les valeurs moyennes mensuelles de la température.

Tableau N°2: Températures moyennes mensuelles à la station d'El Hamma (1999/2014)

station el hamma	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
T°	21,21	16,6	10,93	7,3	6,58	7,39	10,6	12,16	16,02	23,52	26,97	26,13

D'après ce tableau, on peut distinguer :

- Une diminution de la température à partir du mois de Septembre pour atteindre sa valeur minimale au mois de Janvier, mois le plus froid.
- Une élévation de la température croît progressivement du mois de Février pour arriver à une valeur maximale au mois de Juillet, mois le plus chaud

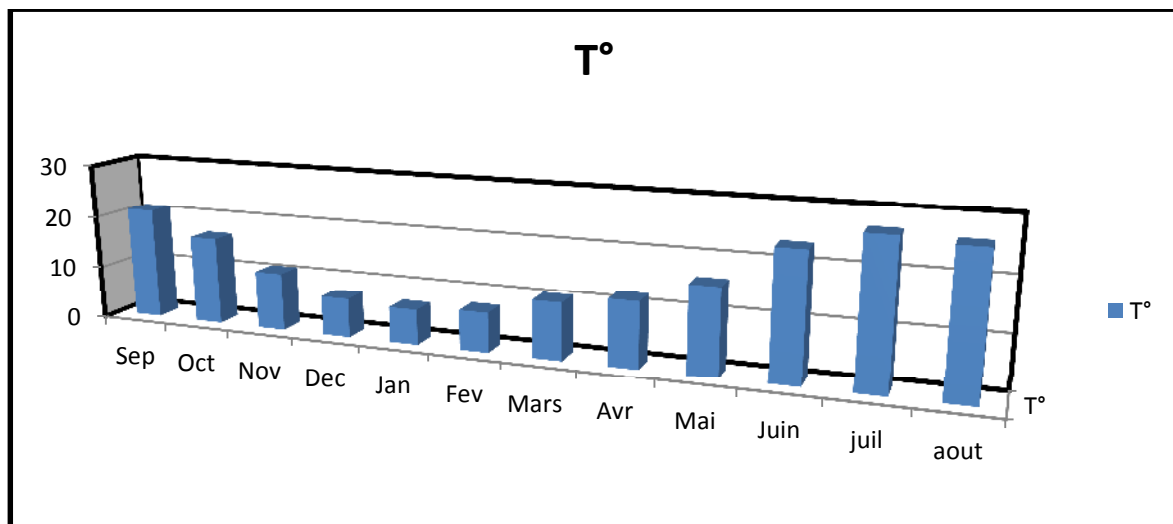


Figure -13 : Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Hamma (1999/2014)

Tableau 3: Températures moyennes mensuelles à la station Boulheilette (1999/2014)

Boulheilette	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juille	aout
T (°C)	20,9	16	10,6	7,2	6	7,2	9	11	16,2	21,7	24	24

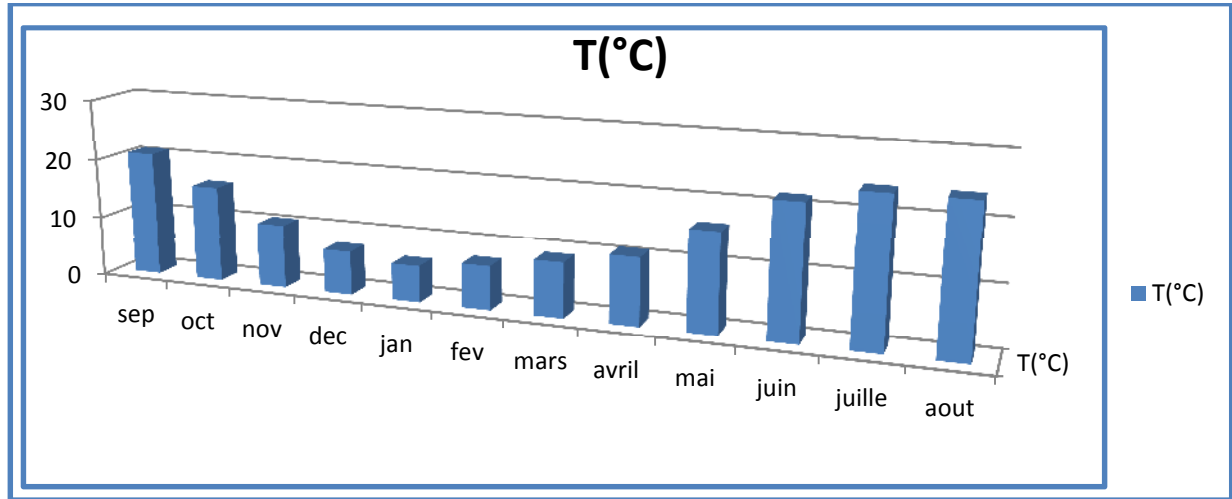


Figure-14 : Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Boulheilette (1999/2014)

Tableau (4) : Températures moyennes mensuelles à la station Yabou (1999/2014)

mois	sept	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	Juin	juill	aout
T (°C)	20	13,7	9,7	5,8	4	6	7,8	11	15	21,7	24	24

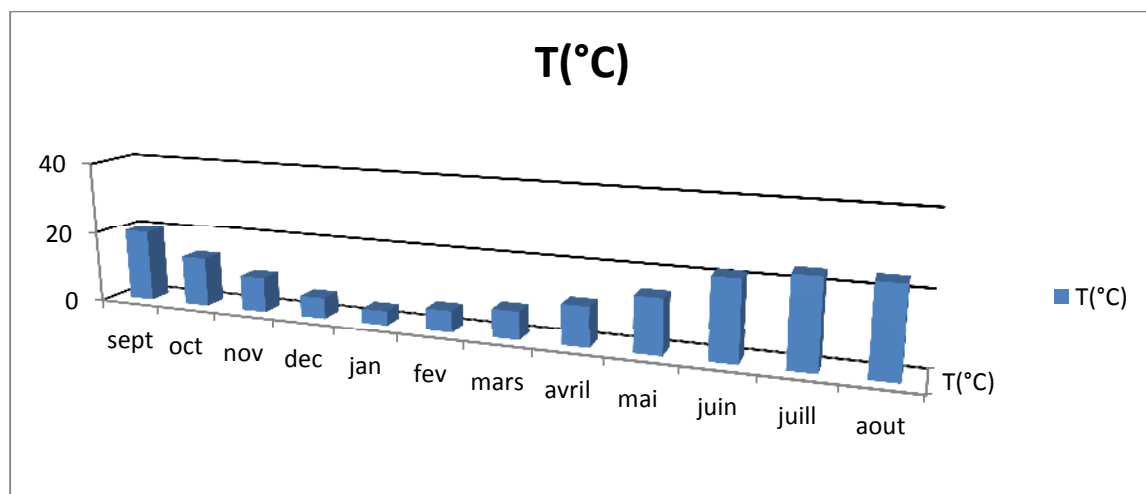


Figure-15 : Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Yabou (1999/2014)

Tableau N°05: Températures moyennes mensuelles à la station Ain Mimoun MF (1999/2014)

Mois	sept	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juill	aout
T (°C)	20	14	8	4	4	4	8	12	16	22	25	24

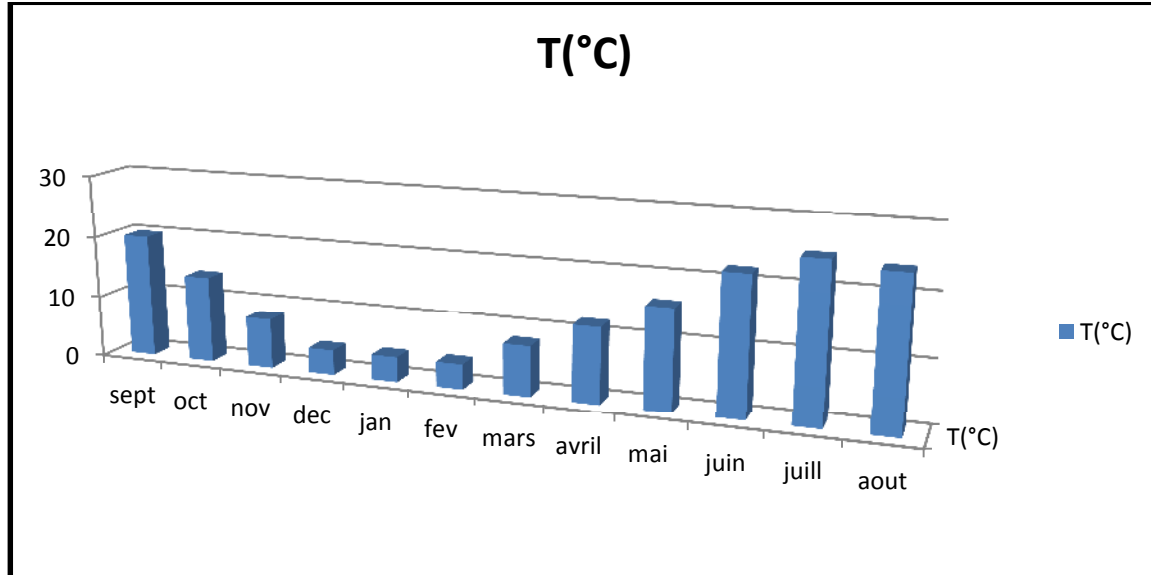


Figure-16 : Histogramme des températures moyennes mensuelles à la station d'El Ain Mimoun MF (1999/2014)

Les remarques qui ont été faites au niveau de la station d'El Hamma sont identiques à celles de Boulhelette et Yabou ,Ain mimoun MF où l'on observe deux périodes : la première où la température décroît à partir du mois de Septembre pour atteindre sa valeur minimale au mois de Janvier qui est le mois le plus froid ; puis une deuxième période où la température croît progressivement du mois de Février pour aboutir à sa valeur maximale au mois de Juillet qui considéré comme le mois le plus chaud.

5-Notion de bilan d'eaux

Le bilan de l'eau global correspondant à une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan de la zone d'étude, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évapotranspiration). Pour cela, on va se baser sur les données des 4 stations météorologiques.

Les enseignements du bilan hydrique de Thornthwaite Partent de la connaissance des précipitations P, de l'évapotranspiration potentielle E.T.P. et réelle et d'une valeur maximale standard de la réserve facilement utilisable du sol ou R.F.U. (100mm). La méthode du bilan hydrique (ou évaporométrique) de Thornthwaite est adoptée afin de quantifier mois par mois les différentes composantes du bilan.

6-Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales. Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, nous avons appliqué la formule de Thornthwaite.

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

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

$$I = \sum_i i$$

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

ETP: Evapotranspiration potentielle du mois considéré en (mm)

T : Température moyenne du mois considéré en ° C.

K : Coefficient d'ajustement mensuel (**donné en fonction de l'altitude et du mois considéré**).

I : indice thermique annuel. Les résultats sont portés dans le tableau suivant

Tableau N06: Bilan hydrique à la station d'El Hamma (1999/2014)

station D'El Hamma	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
T° (C)	21,2	16,6	10,9	7,3	6,6	7,4	10,6	12,2	16	23,5	25	26,1	
P (mm)	53,6	41,1	42,2	44,9	39	25,2	37,5	51,9	73,4	29,3	16,4	37,4	533,2
ETP (mm)	100,1	57,9	1,68	11,6	10,1	0,91	31,	41,9	4,9	150,2	188,3	11,7	668,3
ETR (mm)	79,3	41,1	1,68	11,6	10,1	0,91	31,	41,9	4,9	129,3	16,5	11,7	379,9
RFU (mm)	0	0	40,6	73,9	100	100	100	100	100	0	0	25,7	640,2
DA (mm)	20,8	16,9	0	0	0	0	0			20,9	171,9	0	230,5
Écoulement (mm)	0	0	0	0	2,9	24,4	6,5	10	68,5	0		0	112,3

D'après le bilan hydrique dans la station d'El Hamma, calculé par la méthode de Thornthwaite, nous constatons que la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum (100 mm) de

Janvier à Mai, période pendant laquelle il y a un surplus d'eau se manifestant par un écoulement.

La RFU diminue à partir du mois Juin jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Mai où on observe l'apparition d'un déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre

Tableau N07: Bilan hydrique à la station Boulheilette (1999/2014)

Boulheilette	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Total
T(°C)	20,9	16	10,6	7,2	6	7,2	9	11	16,2	21,7	24	24	
P (mm)	58,7	41,5	36,9	45,8	46	33,	49,6	56,1	64,4	33,4	17,4	41,7	524,5
	8,5	5,7	3,08	1,7	1,3	1,7	2,4	3,26	5,8	9,	10,5	10,5	
K	1,1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,8	1,0	1,15	1,3	1,3	1,3	1,2	
ETP (mm)	104,1	60,5	26,8	14,	13,6	15,6	28,6	43,5	89,3	139,5	162,3	151,3	849,3
ETR (mm)	58,7	41,5	26,8	14,	13,6	15,6	28,6	43,5	75,1	33,4	17,4	41,7	410
RFU (mm)	0	0	10,1	41,8	74,2	91,6	100	100	0	0	0	0	417,6
DA (mm)	45,5	18,9	0	0	0	0	0	0	14,2	106,1	144,9	109,6	439,3
ECOULLEMENT(mm)	0	0	0				12,6	12,6	0	0	0	0	25,1

D'après le bilan hydrique dans la station Boulheilette, calculé par la méthode de Thornthwaite, nous constatons que la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum (100 mm) de mars à Avril , période pendant laquelle il y a un surplus d'eau se manifestant par un écoulement.

La RFU diminue à partir du mois Mai jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Mai, où on observe l'apparition d'un déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre.

Tableau N08 : Bilan hydrique à la station Yabou (1999/2014)

mois	sept	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juill	aout	Total
T(°C)	20	13,7	9,7	5,8	4	6	7,8	11	15	21,7	24	24	
p(mm)	48,7	32,3	38,5	43,4	34,2	33,7	50,1	35,9	53,7	29,1	22	44,5	466,1
ETP (mm)	97,8	49,1	24,6	10,9	6,7	12,8	24,4	45,2	81,2	139,4	161,2	150,3	803,6
ETR (mm)	48,7	32,3	24,6	10,9	6,7	12,8	24,4	45,2	64,9	29,1	22	44,5	366,1
K	11	0,9	0,8	0,7	0,7	0,78	1,02	1,15	1,3	1,3	1,3	1,2	
RFU	0	0	13,9	46,4	73,9	94,8	100	11,2	0	0	0	0	340,2
DA	49,1	16,8	0	0	0	0	0	0	16,3	110,3	139,2	105,8	437,5
ECOUL	0	0	0		0	0	20,5	0	0	0	0	0	20,5

D'après le bilan hydrique dans la station Yabou, calculé par la méthode de Thornthwaite, nous constatons que la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum (100 mm) au mois de mars, période pendant laquelle il y a un surplus d'eau se manifestant par un écoulement.

La RFU diminue à partir du mois d'Avril jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Mai, où on observe l'apparition d'un déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre

Tableau N09 : Bilan hydrique à la station Ain Mimoun MF (1999/2014)

mois	sept	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juill	aout	Total
T (°C)	20	14	8	4	4	4	8	12	16	22	25	24	
P (mm)	36,6	34,1	39,4	40,2	38,8	27,7	39,9	41,1	71,9	31,2	13,4	34,5	448,8
K	1,05	0,91	0,75	0,7	0,73	0,8	1,02	1,2	1,3	1,3	1,33	1,2	
ETP (mm)	97,7	50,5	18,5	6,4	6,6	7,1	25,2	51,1	88,9	142,1	170,9	150,2	815,3
ETR (mm)	36,6	34,1	18,5	6,4	6,6	7,1	25,2	51,1	87,1	31,2	13,4	34,5	351,8
RFU (mm)	0	0	20,9	54,7	86,9	100	100	15,2	0	0	0	0	377,7
DA (mm)	61,1	16	0				0	0	0	110,9	157,5	115,7	461,7
Écoulement (mm)	0	0	0			7,5	14,7	0	0	0	0	0	22,2

D'après le bilan hydrique dans la station Ain Mimoun MF, calculé par la méthode de Thornthwaite, nous constatons que la RFU (réserve facilement utilisable) commence à se reconstituer à partir du mois de novembre pour atteindre son maximum (100 mm) au mois de Février jusqu'au Mars, période pendant laquelle il y a un surplus d'eau se manifestant par un écoulement.

La RFU diminue à partir du mois d'Avril jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Juin, où on observe l'apparition de déficit agricole (DA) qui se poursuit jusqu'à Octobre.

Les résultats obtenus à l'échelle mensuelle sur les quatre 4 stations climatologiques sont reportés sur le tableau N° (10). Ils permettent de dessiner des profils représentant l'évolution géographique générale de chacun des éléments du bilan hydrique

Tableau N10 : Bilans hydriques mensuelle des 4 stations de la zone d'étude

station	Boulheilette	Yabou	El Hamma	Ain mimoun MF
T° (c) d'apprêt la carte ANRH	14,5	13,6	15,5	13,4
P (mm)	43,7	38,8	44,4	37,4
ETP (mm) d'apprêt la formule de Thornthwait	70,8	67	55,7	67,9
ETR (mm) d'apprêt la formule de Thornthwait	34,2	30,5	31,7	29,3
DA (mm)	93,7	36,5	23	51,3
RFU (mm)	34,8	28,4	53,4	31,5
EXC (mm)	2,8	1,9	10,2	2,2

Précipitation moyenne mensuelle des 4 station 41.1 mm

RFU moyen mensuelle des(4) station est de 37 , pour ETR =31.4

Excédent moyen mensuelle des (4) station est de 4.3 c'est-à-dire que l'excédent égal à 10% des précipitations mensuelle

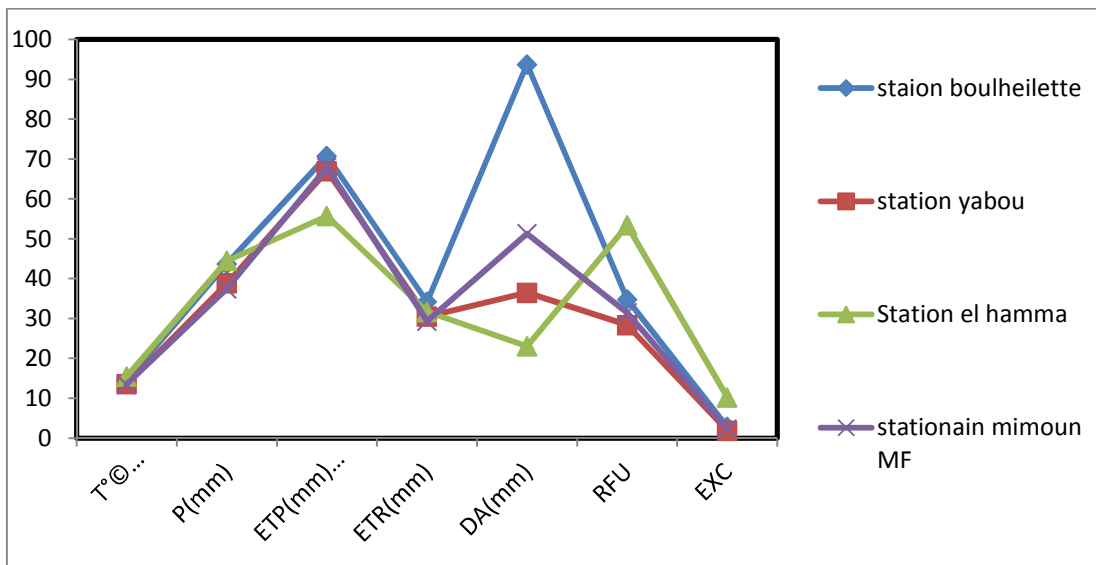


Figure-17 : Variations des éléments du bilan hydrique mensuel moyen des 4 stations
Période (1999-2014)

D'après le bilan hydrique mensuelle moyen des 4 stations, calculé par la méthode de Thornthwaite, nous constatons que la région d'étude se trouve dans un climat semi-aride (faible précipitation 40 mm et très forte évaporation 70 mm moyenne mensuelle)

7- Le ruissellement et l'infiltration:

Pour déterminer le bilan hydrologique, il est nécessaire d'évaluer le ruissellement dans le but d'apprécier l'importance de l'érosion mécanique et chimique qui affecte la surface de la terre. La formule de TIXERONT-BERKALOFF permet d'estimer le coefficient de ruissellement (R)

$$R = \left[\frac{P^3}{3[ETP]^2} \right]$$

Avec

R : Ruissellement en (mm).

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETP : évapotranspiration potentielle en (mm).

NB:

Cette formule n'est valable que pour des valeurs de précipitations moyennes annuelles ne dépassant pas les 600 (mm). Si la précipitation P est supérieure à 600 mm, on utilise la formule suivante:

$$\boxed{R = P^3/3}$$

L'infiltration est la quantité d'eau franchissant la surface du sol, Elle renouvelle les stocks d'eau souterraine et entretient le débit de l'écoulement souterrain et sortant après circulation dans les formations hydrogéologiques perméables du sous – sol.

La formule de bilan global:

$$P = R + I + ETR$$

$$\text{On aura: } I = P - R - ETR$$

Avec :

P : Précipitation moyenne mensuelle en (mm).

R : Ruissellement en (mm).

I : Infiltration en (mm).

Tableaux N°11 : bilan hydrologique infiltration est ruissèlement des 4 stations

Nom de station	Bassin Versant	sous bassin versant avec le code	Superficie (Km ²)	Ruissèlement (mm)	infiltration (mm)	volume écoulé (Le*S*10 ⁻³ Hm ³)	volume infiltré Hm ³
Hamma	haut plateaux constantinois	Oued Gueis BV(070702)	144	9,4	2,9	1,4	0,4
Ain Mimoun MF		Oued Gueis BV(070702)	144	3,8	4,3	0,5	0,6
Yabous		Taarist BV(070601)	77	4,3	4	0,3	0,3
Boulhelett		Oued Boulhilette BV(070501)	765	5,5	4	4,2	3,1

station	Station Boulheilette	Station Yabou	Station El Hamma	Station Ain Mimoun MF
Superficie (Km ²)	765	77	144	144
Débit Total (P-ETR)*S (hm ³ /an)	7296,6	641,6	1840,2	1164,2
Débit écoulé (hm ³ /an)	2134,4	143,5	1469,4	320
Débit infiltre (hm ³ /an)	5162,2	498,1	370,8	844,2

8-Conclusion

Le climat de la région est de type semi-aride avec une composante d'altitude influencée par les courants d'air froid et humide en provenance des massifs des Aurès (maximum des précipitations en hiver et au printemps, couverture neigeuse peu durable mais parfois importante, saison sèche à orages brutaux en été, effet de barrage des reliefs, favorisant les précipitations sur les versants Sud). Les précipitations, moins importantes qu'en altitude, n'atteignent cependant que 350 mm par année, desquelles il faut retrancher une évapotranspiration réelle

La répartition des précipitations mensuelles montre deux grandes saisons bien distinctes. Une saison sèche et chaude qui s'étend, du mois de mai à octobre, , et une saison relativement humide, qui s'étale sur les mois de novembre et avril, les températures moyennes mensuelles varient entre 6°C et 26°C Le mois le plus froid est Janvier (6°C sur les hauteurs du bassin de Rémila). L'évaporation est minimale pendant le mois de Janvier alors que la maximale intervient pendant les mois d'été. Près de 50% de l'évaporation totale est enregistrée durant les quatre mois de Juin à Septembre.

Le ruissellement est de l'ordre de 5.75 mm par contre lame d'eau infiltrée est de 3.8 mm. Le déficit hydrique, autant que le déficit climatique, s'amorcent au mois d'Avril et se prolonge jusqu' au mois d'Octobre.

CHAPITRE 3

ETUDE

HYDROGEOLOGIQUE

Apport de la géophysique

1- Prospection électrique:

1-1-Introduction

La partie de la plaine couverte par la prospection est située à l'Est de Batna, le long de la route Batna –Tebessa.

La 1^{ère} prospection de la plaine de Rémila Khenchela remonte aux années 1969-1970, époque où fut réalisée par la C.G.G une étude géophysique par sondages électriques.

L'objectif de l'étude était de répondre aux questions :

- ✚ Déterminer la profondeur des **calcaires Aptiens** en bordure du sud de Djebel Fedjoudj
- ✚ Déterminer la profondeur et l'extension des **graviers burdigaliens** dans la partie sud de la plaine.
- ✚ Reconnaissance des zones de **meilleures transmissivités** dans le remplissage quaternaire.

1-2-Travaux effectués

Pour répondre à ces questions 600 S.E ont été réalisés dans la plaine avec une longueur d'émission AB variant de 600 à 4000 m.

L'étude géophysique n'a pu établir la carte en isobathes du substratum crétacé. De même le toit des « grès Miocènes » n'a pas pu être déterminé, par contre le remplissage grossier du bassin a bien été étudié, il s'agit **de conglomérats et graviers d'épaisseurs variables**

1-3- Reconnaissance géologique et analyse des résultats

A la suite de l'étude géophysique et au vu des résultats obtenus, l'ANRH a réalisé 19 forages de reconnaissance de profondeurs variant de 70 à 279 m qui ont alors apporté de nouvelles informations. Les 19 forages réalisés permettent de tirer un certain nombre de conclusions dont les plus importantes sont :

- ✚ L'existence de plusieurs nappes profondes contenues dans les différents niveaux grossiers du remplissage, et mise en évidence par la prospection géophysique. Les aquifères sont constitués de conglomérats de graviers et graviers sableux.

L'existence d'une zone artésienne au centre de la plaine où le niveau statique a atteint plus de 8 m, et, ayant disparu à l'heure actuelle, suite à la mise en exploitation de plusieurs forages La plaine de Remila-Khnechela se présente sous forme d'un vaste bassin de remplissage ou l'anticlinal du Djebel Amrane la divise en deux synclinaux.

La figure-18 nous a permis de dégager les grandes lignes structurales du substratum antéquatenaire . La prolongation vers l'Est des formations Cénomaniens-Turonien de Djebel Amrane a été assez nettement mise en évidence ;

- Le passage d'Ouest en Est des calcaires Turoniens et Cénomaniens aux marnes Cénomaniennes qui constituent le substratum sous le Garaet et Tarf
- Le substratum calcaire est limité à l'ouest par Djebel Amrane et au Sud par le bassin miocène

Le prolongement des calcaires aptien du Djebel Fdjouj vers le sud a pu être suivi jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 500-600m, une faille longitudinale qui effondrerait ces calcaire au Sud.

Les formations Miocènes qui s'allongent le long de la bordure sud du bassins avec une allure synclinale délimitée sous le recouvrement quaternaire.

Le recouvrement était formé de plusieurs niveaux grossiers au sein d'un ensemble argileux – sableux. Ces niveaux se présentent sous la forme de vastes lentilles, parfois sans liaison entre elles.

- Dans la partie Ouest et centre de la plaine, on a le niveau le plus important qui correspond aux conglomérats profonds qui fournissent l'artésianisme du forage Bou saha ; il est moins important et moins profond dans la partie sud est de la plaine soit en s'approfondissant et en s'amincissant et laisse place à des sédimentations récentes du bassin de Great et Tarf

Recouvrement superficiel représentant des cônes de déjection des oueds récents ou des dépôts de piémont



Figure -18 :carte des grandes ligne structurales et tectonique du substratum antéquatenaire

Apport de l'hydrogéologie

2-Hydrogéologie de la plaine

2-1-INTRODUCTION

L'aquifère est un système dynamique caractérisé par sa configuration et sa structure, les fonctions de son réservoir et ses comportements. L'identification d'un aquifère repose sur trois critères : géologique, hydrodynamique et hydrochimique.

La lithologie des trois principaux systèmes aquifères de la région de Khenchela se présente comme suit :

a- Le Crétacé

L'épaisseur de ces formations aquifères ne dépasse pas les 250 m et la lithologie diffère d'une zone à une autre, marquée surtout par:

- ✓ Des formations du sénonien: qui sont : des marnes et calcaires crayeux, marnes grises bleues et calcaires, marnes grises et marno-calcaires.
- ✓ Des formations du Crétacé moyen : ce sont des calcaires à cassures écailleuses, des marnes beiges et calcaires noduleux, que des marno-calcaires.

b- Le Miocène

Est formé essentiellement par des grès blancs grossiers, marnes biomicrites et biomicroparites. Le mur de cette formation est constitué par des argiles siliceuses beiges et rouges, le toit est formé par des argiles et argiles siliceuses rouges.

La variation de l'épaisseur de cette formation est comprise entre 100 et 200 m.

c- Le Quaternaire

Les différents faciès lithologiques, correspondent à :

- des éboulis à blocs alluvions récentes, terre arables et glacis polygéniques
- une croûte calcaire.

La variation de l'épaisseur de cette formation est comprise entre 5 et 30m

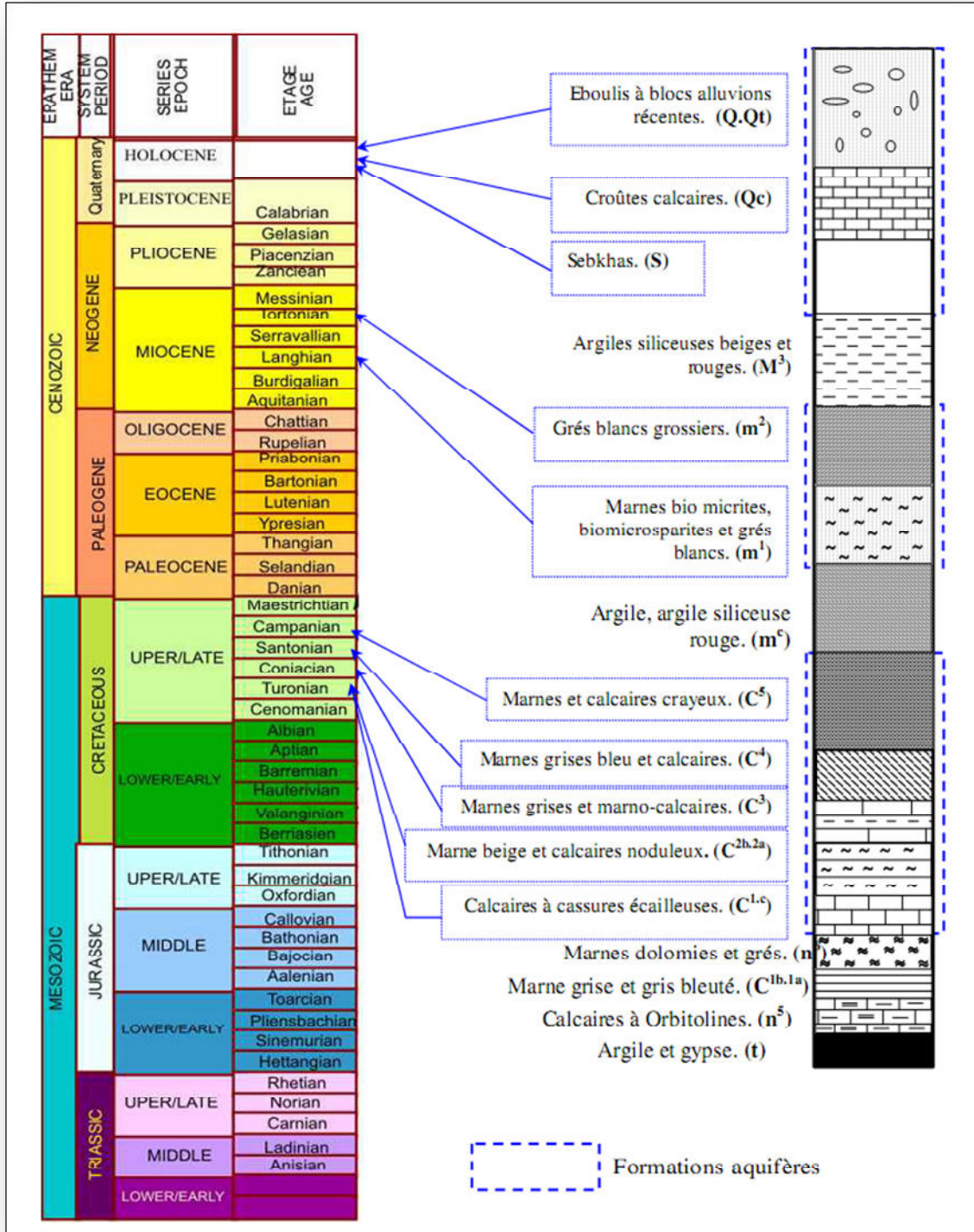


Figure -19 : Position stratigraphique des principales formations aquifères de la région de Khenchela

Tableau N° 12 : les formations aquifères au niveau de la région de Khenchela

Unité	Système et Sous système	Etage et sous étage	Symbole	Lithologie	Epais (m)	Affleurement	Perméabilité relative	Type de nappes	
Quaternaire			e.A.Q.Qt	Eboulis à blocs alluvions récentes, terre arables, Glacis polygéniques. (Couche n°1)	/	/	Perméable	Nappe du quaternaire	
			Villa franchien	Qc	Croûte calcaire. (C2)	/	/		Perméable
				S	Sebkhas. (C3)	/	Gareat et tarf Chot el melah		Perméable
Miocène	sup	Turonien	sup	m ³	Argiles siliceuses beiges et rouges. (C4)	150	Autours de Baghai	Imperméable	substrat
	moy		Inf	m ³	Grès blancs grossiers. (C5)	300	Dj.Amrane, Dj.kharroub Dj el Menchar	Perméable	N.Miocène
Cétoacé	Inf	Langhien-serravalien		m ¹	Marnes biomicrites, biomicroparites et grés blanc. (C6)	36	Kef tifeleressa, Ras serdoun, Ras tiftassine	Semi-perméable	substrat
		Aquitano-burdigalien		m ^e	Argile, argile siliceuse rouge. (C7)	60	Dj.Amrane, au sud de Ain hammam	Imperméable	
	Sénonien	Campanien		C ⁵	Marnes et calcaires crayeux. (C8)	250	Dj.Aoures	Semi-perméable	N.Cétoacé
		Santonien		C ⁴	Marnes grises bleu et calcaires. (C9)	/	Dj.Aoures	Semi-perméable	
		Coniacien		C ³	Marne grises et marno-calcaire. (C10)	150	Dj.Aoures	Semi-perméable	
	Moy	Turonien		C ^{2b,2a}	Marnes beiges et calcaires noduleux, marno-calcaire. (C11)	350	Dj.Amrane	Semi-perméable	substrat
Cénomanien		sup	C ^{1o}	Calcaires à cassures écailleuses. (C12)	/	DJ.Chelia	Semi-perméable		
		Inf-moy	C ^{1b,1a}	Marne grise et gris bleuté. (C13)	>650	Le flanc N-W de l'anticlinal de khenchela	Imperméable		
Albien		n ⁶	Marne dolomies et grés. (C14)	160	autour de l'anticlinal de khenchela	Imperméable			
Aptien		n ⁵	Calcaires à Orbitolines. (C15)	200	Dj.fedjoudj,Ras serdoun	Imperméable			
Trias			t	Argile et gypse. (C16)	/	Proximité de khenchelaâ	Imperméable		

2-2-Lithologie et âge des formations aquifères de la plaine de Remila (wilaya de Khenchela)

Afin d'éviter des interprétations hasardeuses, nous ne tiendrons compte que des informations fournies par les forages réalisés par l'A.N.R.H. ; à la lumière de ces données on peut affirmer que l'aquifère le plus important est d'âge mio-plio-quaternaire, il est constitué de dépôts tels que :

- Les conglomérats.
- Les graviers plus ou moins hétérogènes.
- Les graviers sableux.

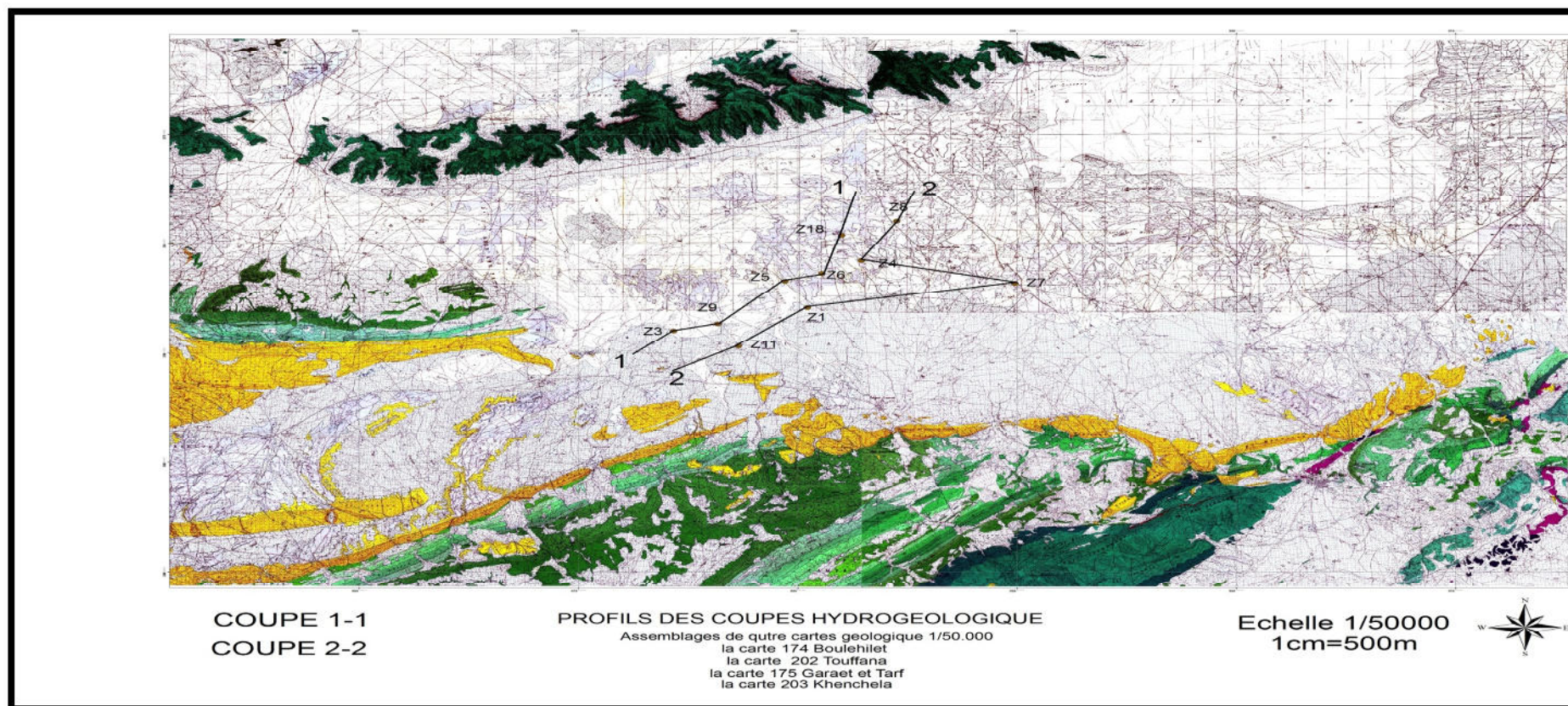
Mais par circonspection, notons que certains forages ont recoupé des formations pouvant être attribuées au crétacé, il s'agit de calcaire finement cristallisé de couleur beige, de calcaire de couleur gris, de marnes calcaireuses jaunes. etc..... D'autre part ces formations n'ont pas fait l'objet d'essais de nappes séparées permettant de savoir si elles contribuent ou pas à l'alimentation des conglomérats..

Enfin, dans le cadre de la réalisation du modèle mathématique de la nappe de Rémila - Khenchela et afin d'éviter des complications, la nappe à étudier sera appelée **Mio-pliocène** et concernera les **dépôts grossiers** du bassin.

2-3- Coupes hydrogéologiques

Pour comprendre le système aquifère, deux coupes hydrogéologiques sont disponibles (figure-20)

Figure-20 : profils des coupes hydrogéologique dans la plaine de Remila-Khenchela



2-3-1-Interprétation de la coupe hydrogéologique

Cette coupe de direction NW-SE est réalisée grâce à la carte géologique de Toufana (J.M Vila, 1/50 000) et La piézométrie réalisé dans la région (figure-21).

La coupe hydrogéologique montre l'aquifère superficielle du Moï-plioquaternaire qui est constitué par des glacis polygéniques du quaternaire et des grés blanc grossiers du Tortonien supérieur. Cela traduit un aquifère à nappe libre dont le niveau piézométrique est subhorizontal qui s'incline vers le Sud-Est (30m au NW et 5m au SE), il s'approche de plus en plus de la surface en s'avançant vers le massif (Djebel Isafbor el Arouah)

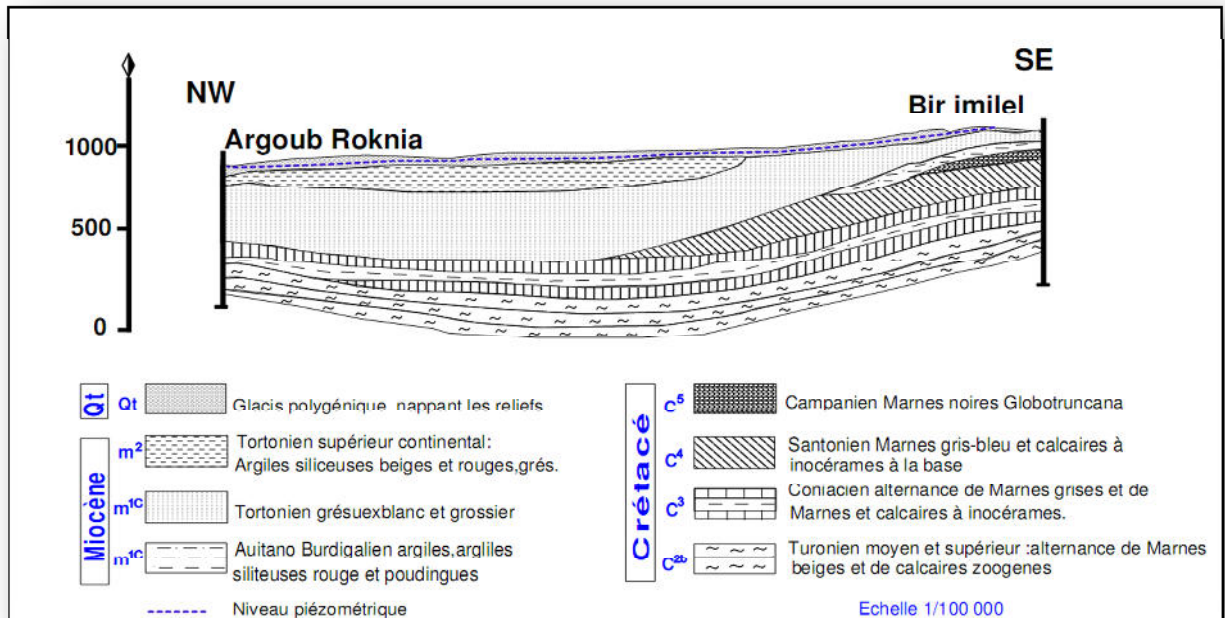


Figure-21 : Coupe hydrogéologique (D'après la coupe géologique de J.M. VILA)

2-3-2-Interprétation de la coupe hydrogéologique I et II (figure -22 et -23)

Les deux coupes hydrogéologiques sont de direction Sud-Ouest Nord-Est et basées essentiellement sur les logs stratigraphiques des forages :(Z3,Z9,Z5,Z6,Z18 Z1,Z4,Z7,Z8,Z11).

Les deux coupes montrent deux formations plus importantes, l'une superficielle à porosité d'interstice et l'autre profonde à porosité de fissures.

La formation hydrogéologique à nappe libre se présente par des sables, sable marneux, des graviers, des grés et des conglomérats.

Au sud-ouest, cette formation est d'une épaisseur relativement faible, de l'ordre d'une dizaine de mètres. Au Nord-Est, l'épaisseur est plus grande.

L'autre formation est constituée de marnes, de calcaires et de marno-calcaires. L'épaisseur de cette formation au Sud-Ouest est plus importante qu'au Nord-Est.

Dans les deux coupes (1-1) et (2-2) on a des forages artésien au centre de la plaine malheureusement depuis des années se phénomène hydrogéologique a disparut

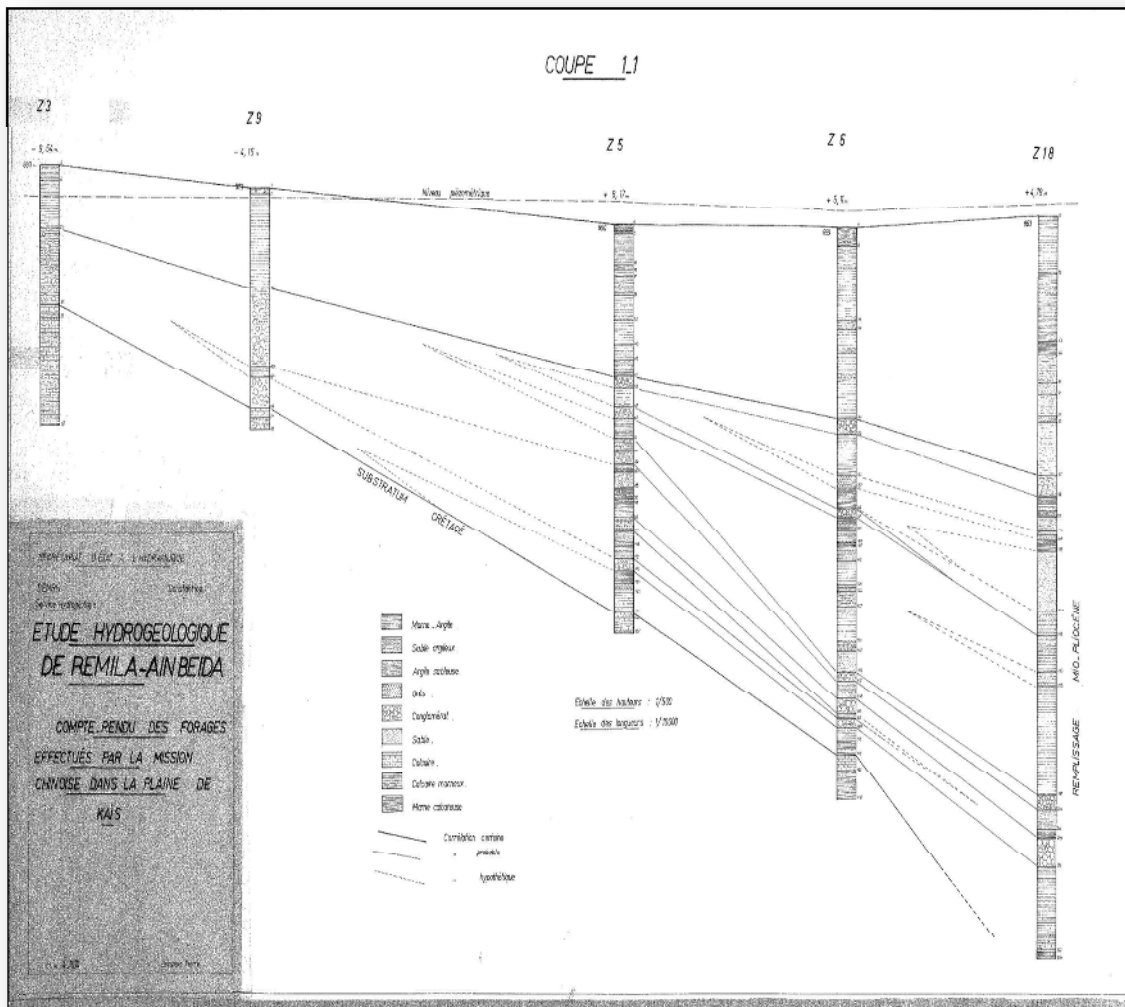


Figure -22 : coupes1-1 coupe hydrogéologique I des forages (Z3,Z9,Z5,Z6,Z18)
Source ANRH 1979

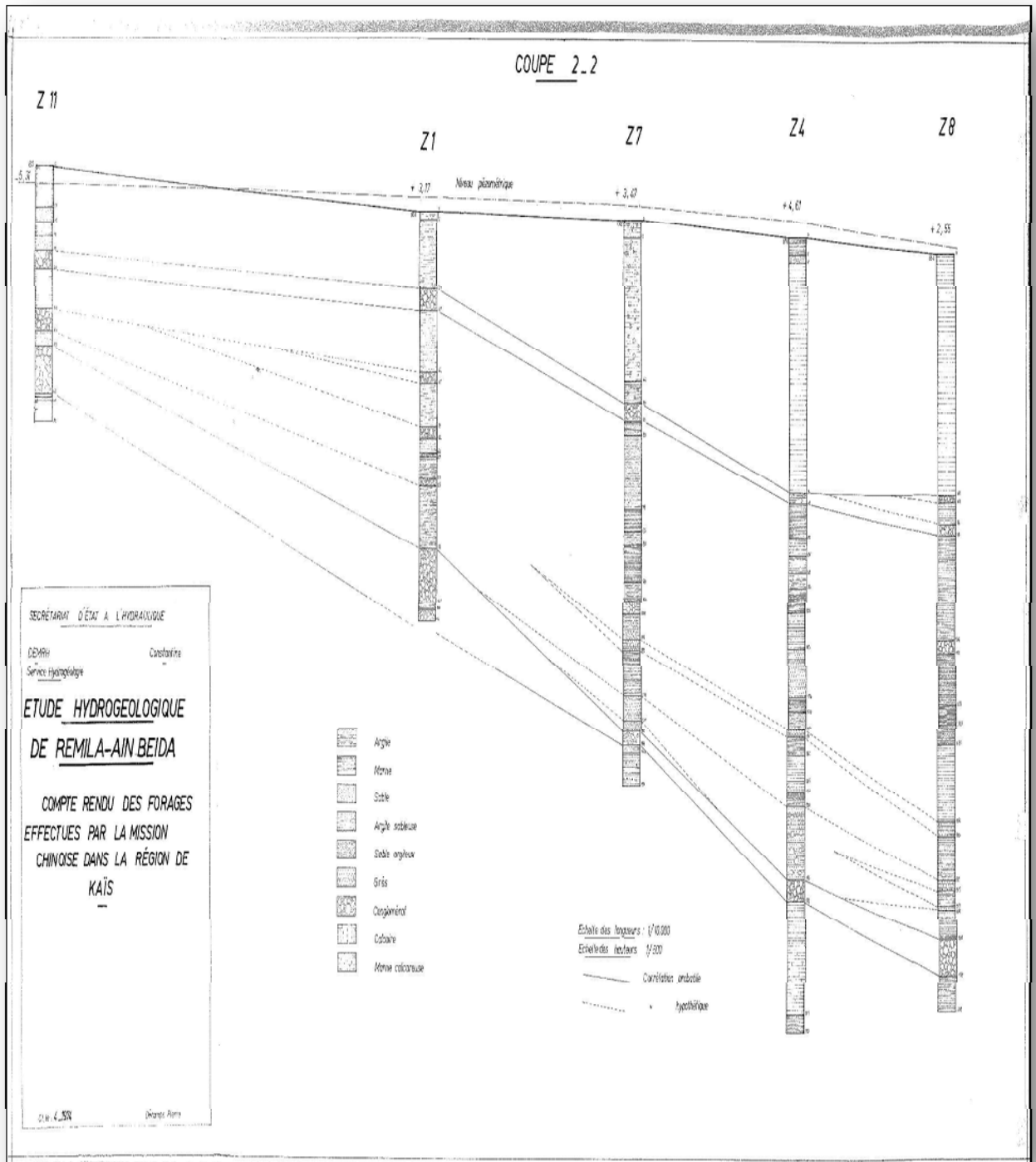


Figure-23 : les coupes 2-2 coupe hydrogéologique II des forages (Z1,Z4,Z7,Z8,Z11)(source ANRH 1979)

2-4-Etude de l'écoulement du système aquifère

2-4-1-Réseaux de surveillance de la plaine Remila

Le réseau de surveillance de la plaine de Remila-Khenchela s'effectuait grâce 27 puits et forages depuis 1997 jusqu'à juin 2005.

Les 11 piézomètres réalisés par l'ANRH en 2001-2002 ont été mis en service à partir d'octobre 2005. Ils représentent le nouveau réseau de surveillance de la nappe de Remila dont l'objectif est bien de suivre la fluctuation de la nappe (figure-24).

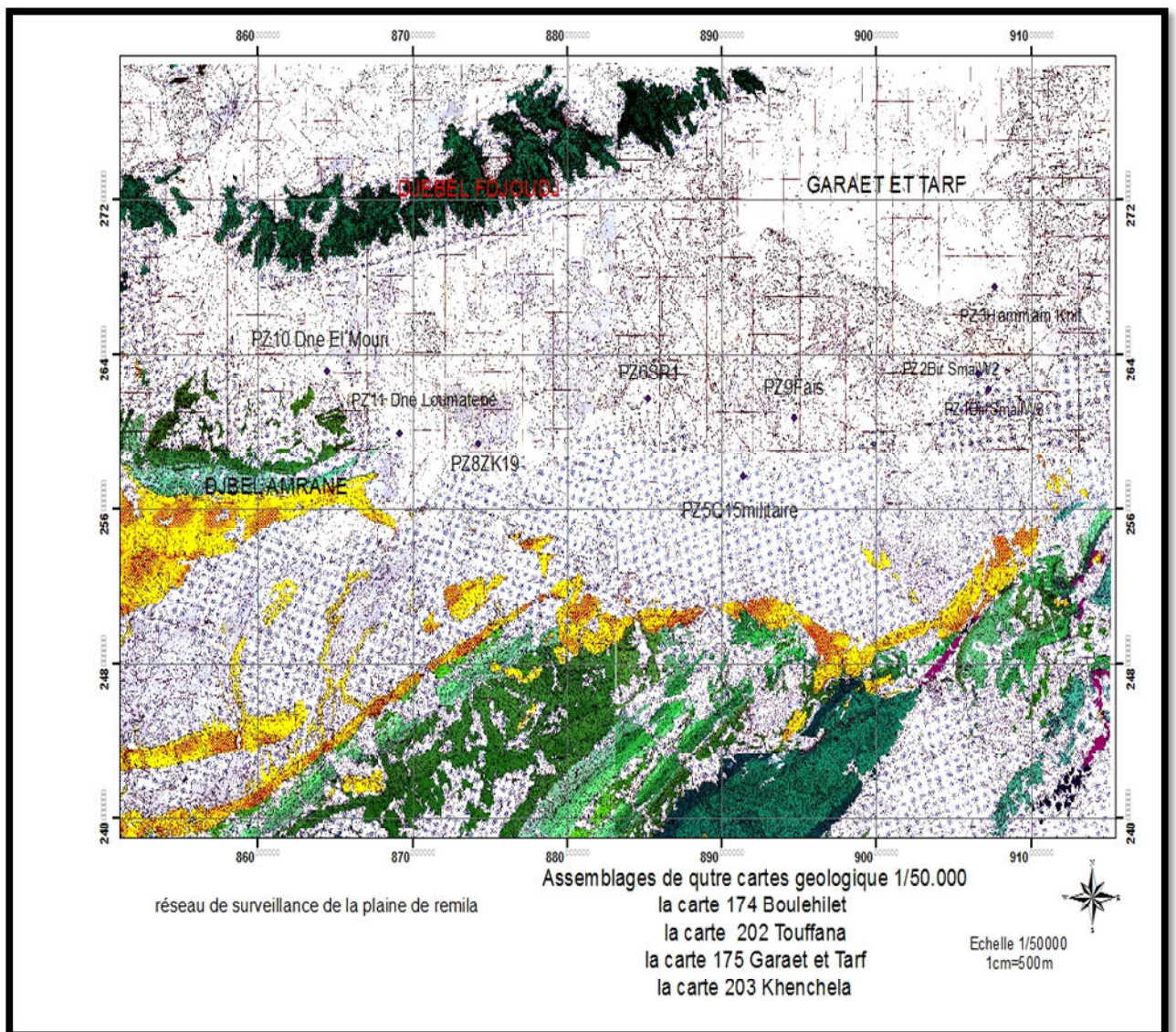


Figure-24 : réseaux de surveillance actuelle de la plaine de Remila-Khenchela

Evolution du niveau statique de 2008 à nos jours, de la plaine de Khenchela en période hautes eaux (voir le tableau N°13)

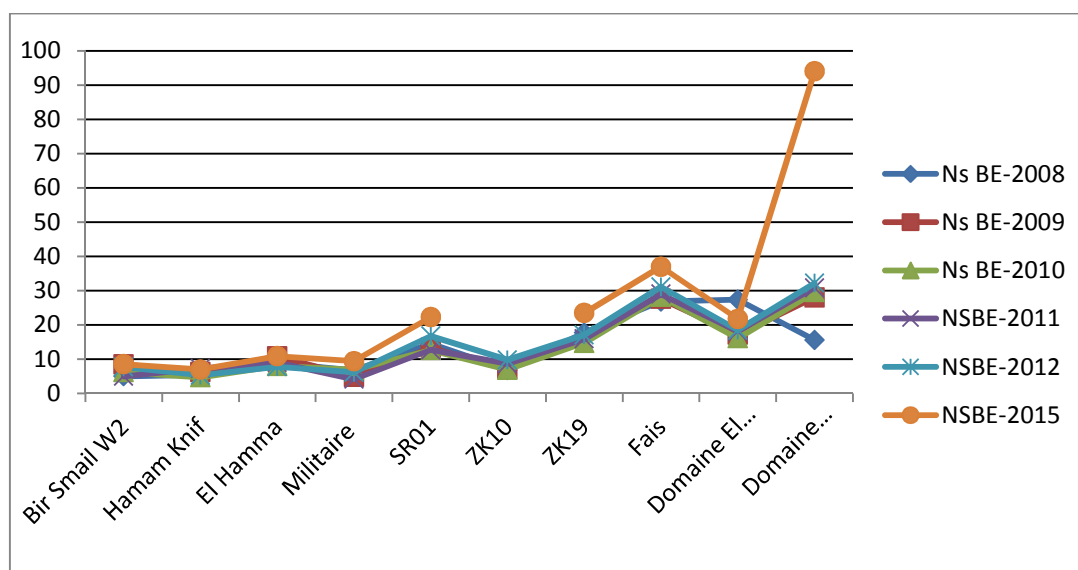
On remarque que l'année 2011 est l'année où la remontée du niveau statique se fait dans tous les piézomètres, et l'année 2016 est l'année de plus fort abaissement du niveau d'eaux dans tous les piézomètres.

- ❖ **Evolution du niveau statique de 2008 à 2015, de la plaine Khenchela en période de basses eaux (voir le tableau N14°)** Même remarque sauf que l'augmentation s'est faite sur la plupart des piézomètres pendant l'année 2011. Le niveau a fortement baissé dans tous les piézomètres pendant l'année 2015.

Tableaux N13 : piézométrie de la plaine de Remila-Khenchela périodes des hautes eaux
(compagne piézométrie réalisé par ANRH)

date	Bir Smail W2	Hamam Knif	El Hamma	Militaire	SR01	ZK10	ZK19	Fais	Domaine El Mouri	Domaine Loumatene
Ns HE-2008	5	5,42	8,85	6,72	14,53	6,8	17,72	26,8	27,35	15,6
Ns HE-2009	8,49	6,2	10,82	4,82	13,28	7,1		27,57	17,11	28,02
Ns HE-2010	6,18	4,69	8	6,9	12,65	6,91	14,73	28,22	16,08	29,56
Ns HE-2011	4,98	7,28	9,02	4,15	12,71	8,68	15,9	28,97	18,1	30,79
Ns HE-2012	7,68	5,32	7,79	6,15	16,73	9,81	17,1	31,1	18,5	32,19
Ns HE-2015	8,52	6,98	10,89	9,42	22,26		23,48	37	21,74	94

Figure-25 : Evolution de niveau statique dans les piézomètres périodes des hautes eaux
(Compagne piézométrie réalisé par ANRH)



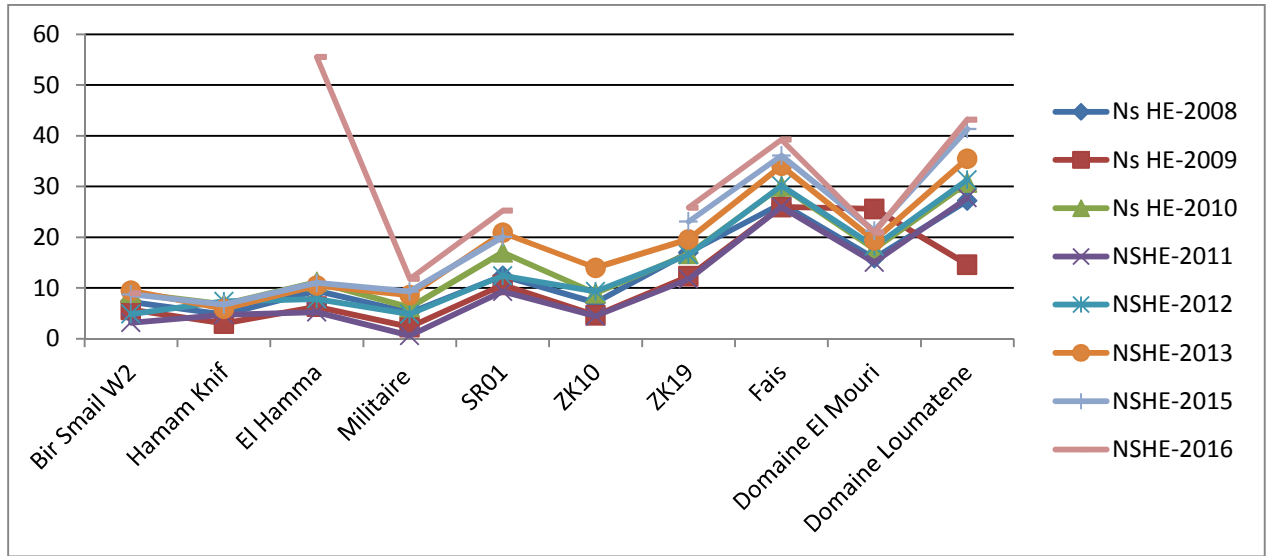


Figure-26 : Evolution de niveau statique dans les piézomètres (périodes basses eaux)
(Compagne piézométrie réalisé par ANRH)

Tableaux N°14 : piézométrie de la plaine de Remila-Khenchela (période des basses eaux)
(compagne piézométrie réalisé par ANRH)

date	Bir Smail W2	Hamam Knif	El Hamma	Militaire	SR01	ZK10	ZK19	Fais	Domaine El Mouri	Domaine Loumatene
Ns BE-2008	7,25	4,8	9,45	5,15	12,4	7,1	17	26,6	15,85	27,21
Ns BE-2009	5,72	3	6,31	2,3	10,6	4,62	12,3	25,96	25,59	14,62
Ns BE-2010	9,04	6,78	11,18	6,18	17,02	8,95	16,69	30	17,66	30,72
Ns BE-2011	3,18	4,74	5,25	0,6	9,32	4,45	11,74	25,96	15,04	27,76
Ns BE-2012	4,87	7,35	7,82	4,83	12,39	9,33	16,54	30,16	18,18	31,33
Ns BE-2013	9,47	5,9	10,48	8,6	20,9	13,99	19,58	34,07	19,4	35,5
Ns BE-2015	8,75	6,74	11,03	9,33	20,08		23,08	36,1	21,25	41,33
Ns BE-2016	9		55,5	11,82	25,23		25,83	39,25	20,93	43,17

2-5-Présentation et nature des nappes aquifères

2-5-1- Nappe phréatique :

📊 Surface piézométrique :

La nappe aquifère est contenue dans le remplissage moi-plioquaternaire dans des intercalation argilo sableuse et dans des sable et graviers.

Les zones d'alimentation se situent :

Principalement au Sud, à partir du versant Nord du Massif de l'Aurès et à l'Ouest, à partir du Djebel Amrane.

L'alimentation par le Djebel Fedjoudj au Nord est considérablement plus réduite

Niveau d'eau de la nappe :

Avant la surexploitation qui a provoqué le rabattement de la nappe le niveau d'eau dans l'ensemble de la plaine peu profonde dans toute la partie centrale et ouest de la plaine. On remarquera une anomalie importante dans la région de Kais, où la nappe est profonde et atteint jusqu'à 30 m pour se trouver très rapidement à 5 m de profondeur à quelques kilomètres au nord. (CGG, 1970 et ANRH, 2002).

2-5-2-Nappes profondes

Les nappes profondes sont reconnues par quelques forages qui ont permis de tester les formations quaternaires et récentes. Aucune autre formation antérieure (grès miocène ou calcaires créacés) n'a été testée dans les limites de la plaine (d'après les données disponibles).

Les forages captent tous des niveaux grossiers ou des conglomérats dans le remplissage quaternaire.

Les Kais 1, Bir Bou Saha, Sonda (Moulin Guerba), Garaa Biar Es Sebaa, Henchir El Azreg apportent des renseignements utiles sur le comportement des nappes profondes.

Le forage de Kais 1 a été pompé pendant 72 heures à 17 l/sec pour un rabattement de 10 m. Ce sont les conglomérats qui ont été captés entre 25 et 50 m.

Le forage de Bir Bou Saha, artésien à 15 l/sec, capte des conglomérats entre 60 et 115 m. Ce forage aurait été pompé à 50 l/sec, mais sans étude précise du rabattement.

Le niveau piézométriques à Kais 1 semble plus faible qu'à Bir Bou Saha, ce qui peut paraître anormal étant donné que l'alimentation générale des nappes se fait principalement à partir du Sud.

Nous remarquerons qu'à Bir Bou Saha, la nappe quaternaire exploitée semble en relation avec une alimentation profonde provenant vraisemblablement des calcaires crétacés. Il est en effet difficile d'expliquer de tels débits et un tel artésianisme par l'alimentation à partir des oueds si près de la bordure de la plaine. On peut cependant se demander pourquoi le forage Kais, voisin et plus au sud, ne présente pas les mêmes caractéristiques.

2-6-Piézométrie et hydrodynamique (figure-27)

La répartition spatiale de la piézométrie est établie à partir des mesures effectuées sur le réseau constitué de 34 points, tous nivelés et mesurés, auxquels s'ajoutent 11 piézomètres réalisés et équipés en 2001 – 2002

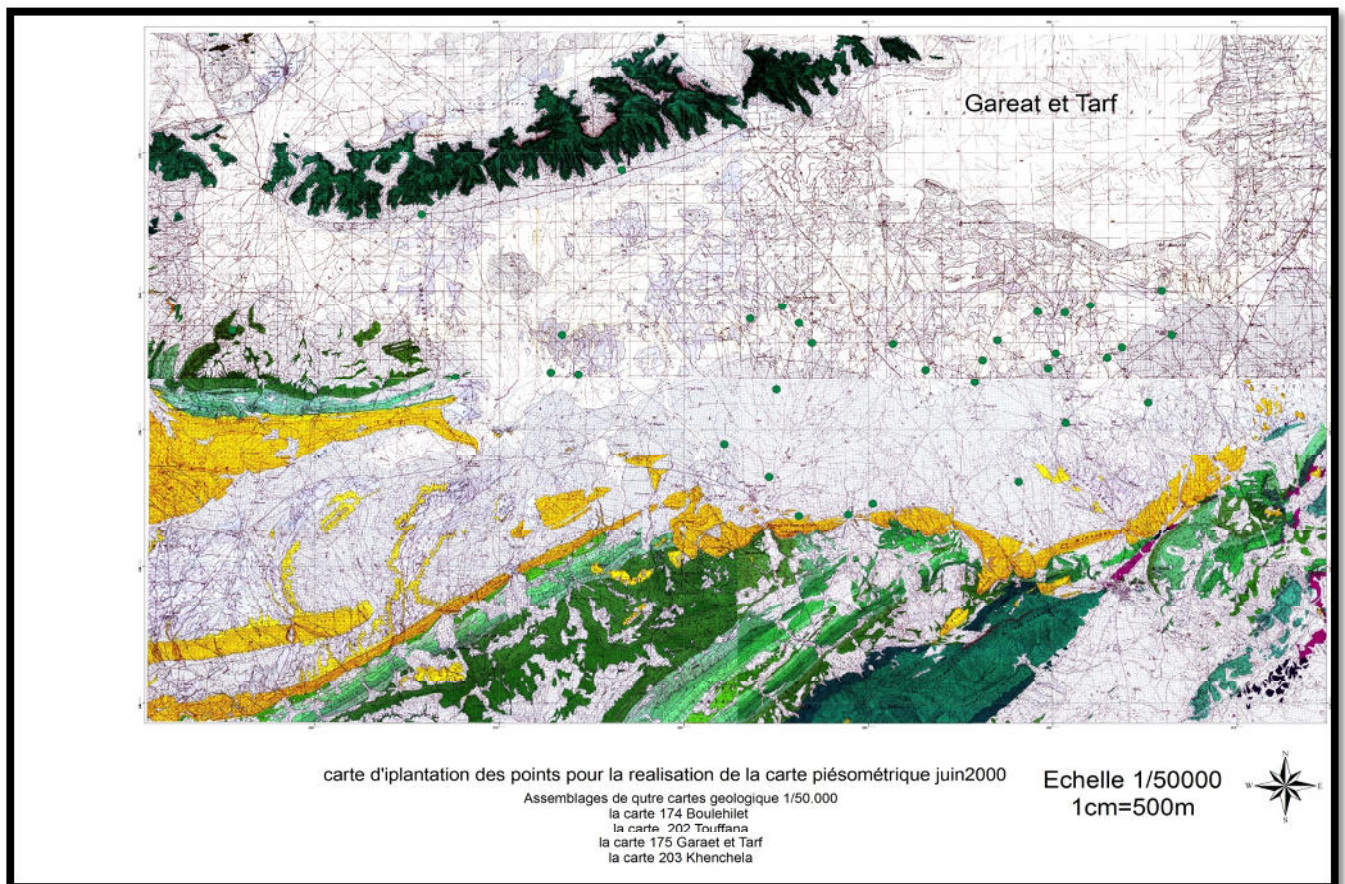


Figure -27: carte d'inventaire des points d'eaux Juin 2000

2-6-1-Interprétation

La carte réalisée à partir de ces points montre que (figure-28):

- ❖ L'axe principal de l'écoulement de la nappe est Sud – Nord
- ❖ un écoulement Nord – Sud du Djebel Fedjoudje vers le centre de la plaine.
- ❖ A l'extrême est, l'écoulement s'oriente nettement vers le chott de Garet et Tarf

L'alimentation par le Djebel Fedjoudj au nord est considérablement plus réduite.

2-6-2-Type et distribution spatiale des conditions aux limites des aquifères :

A titre exploratoire, il a été imposé dans une première phase, des charges hydrauliques sur toutes les limites supposées constituer des zones d'alimentation :

- 1- Sur toute la limite Sud de la nappe.
- 2- Sur la limite Sud –Ouest.
- 3- Sur toute la limite Nord.

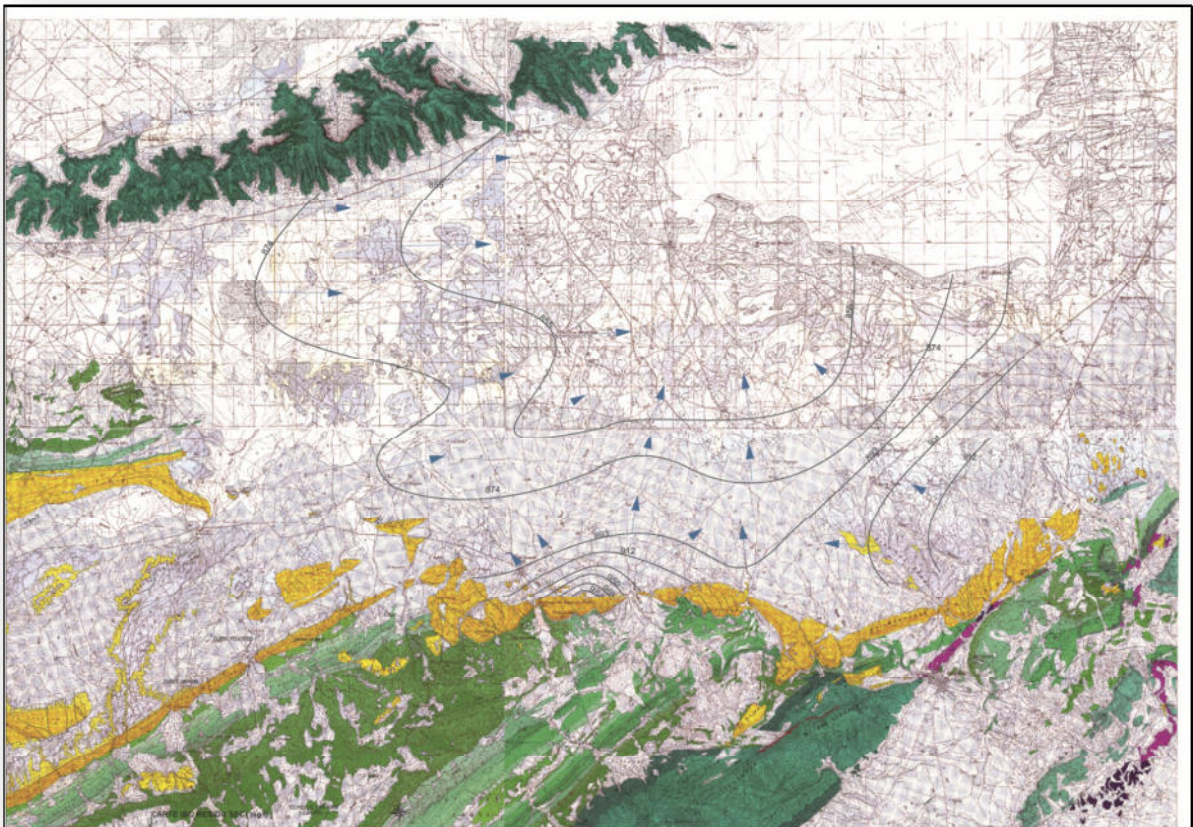


Figure -28: carte piézométrique la plaine Remila-Khenchela de Juin 2002

2-6-3- Paramètre hydrodynamique de l'aquifère

a-Perméabilité et transmissivité

Les paramètres hydrogéologiques tels que perméabilité (K en m/s) et transmissivité (T en m^2/s) sont les paramètres de base pour évaluer les caractéristiques d'un aquifère. Grâce à la base de données de la DHW, et aux données de la littérature, qui regroupent toutes les informations sur les forages anciens et récents sur notre secteur de travail, seules quelques valeurs, de perméabilité de transmissivité, ont été répertoriées (CGG, 70 ; Gasmi, 89 ; Houha 96 et ANRH, 2002).

Dans l'ensemble les perméabilités sont moyennes et il était difficile d'atteindre des débits d'exploitation. La durée des essais de pompages a souvent été de 72h.

Les débits de pompages sont compris pour 80% des cas entre 1 et 10 l/s, seul deux puits ont été testés avec des débits supérieurs à 10l/s. Le rabattement du niveau piézométrique de la nappe était de 1à m au sud et de 2 m au centre de la plaine (Houha 96 et ANRH, 2002).

b-Transmisivités (figure 29)

La transmissivité T a été calculée à partir des essais de pompage réalisés sur 25 forages. Les valeurs obtenues présentées à la figure N°38 on a trois classes

- Classe 0.0002-0.001
- Classe 0.001-0.01
- Classe 0.01-0.018

c- La perméabilité K

On distingue deux zones de perméabilités différentes :

Au centre et au Nord de la plaine, les perméabilités sont de $2 \cdot 10^{-4}$ m/s, en gros les valeurs sont comprises entre $4 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-3}$ m /s

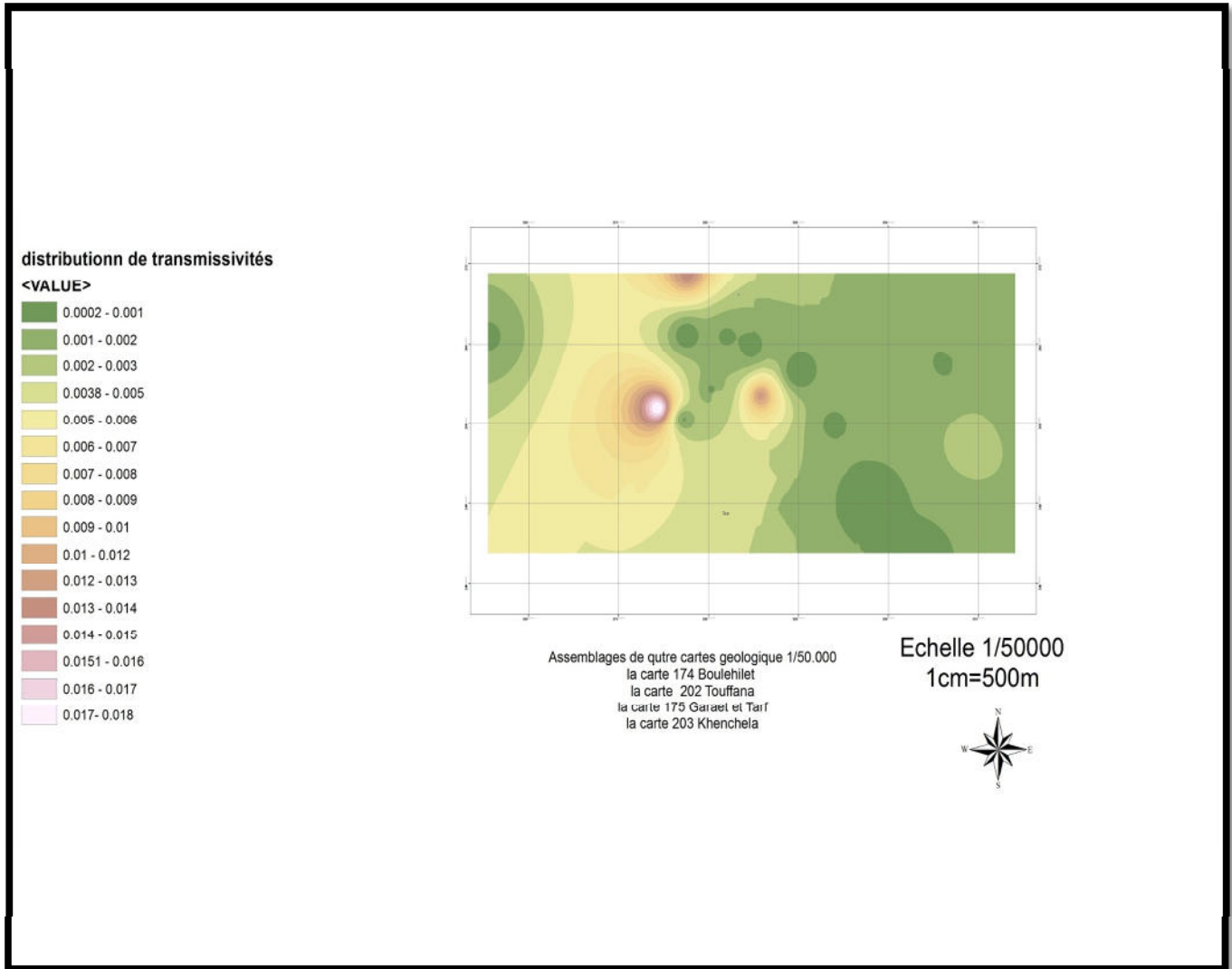


Figure-29: carte de distribution de Transmissivité

2-7-Conclusion

Les forages réalisés par l'ANRH permettent de confirmer que la plaine de Remila- Khenchela est constituée par l'aquifère le plus important qui est d'âge Mio-plio-Quaternaire

Le réseau de surveillance de la plaine indique un rabattement important qui explique la surexploitation de la nappe Remila –Khenchela

L'analyse piézométrique affirme que l'écoulement s'oriente nettement vers le chott de Garet et Tarf.

APPORT DE L'HYDROCHIMIE

1-Introduction

Toute étude hydrogéologique doit être complétée par une étude chimique qui permet de connaître la distribution spatiale de la qualité des eaux souterraines :

Sur la base des résultats des analyses chimiques d'eau (tableau N°) dans l'annexe en l'on tentera d'étudier l'hydrochimie de la plaine de Rémila.

On traitera dans ce qui suit :

- ✚ Les faciès hydrochimiques, la potabilité et l'aptitude à l'irrigation des eaux ;
- ✚ La distribution spatiale de la qualité des eaux souterraines à partir des cartes des conductivités électriques et des nitrates

2-Les eaux de la nappe de la plaine de Rémila

2-1-Faciès hydro chimiques, Potabilité et aptitude à l'irrigation

2-1-1- Les faciès hydrochimiques

Une représentation de l'ensemble des échantillons prélevés sur les puits et forages de la plaine de Rémila est illustrée par le tableau N°16 en annexes sur le diagramme de piper, permettant de visualiser sur le triangle des anions ou des cations des échantillons analysés et de définir non seulement leur faciès grâce aux éléments major, mais de suivre également leur évolution dans le temps. La représentation des concentrations est exprimée en pourcentages.

La représentation des données de l'analyse de l'eau sur le diagramme de Piper a permis de distinguer les faciès chimiques suivants (95% des échantillons sont des faciès chloruré et sulfatés calciques et magnésienes) (figures -30-31-32)

Tableau N°15: Représentation de Piper des eaux souterraines de la plaine de Remila

Faciès chimiques	Chloruré et sulfaté calcique et magnésienne	Bicarbonaté calcique et magnésienne	Chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique
Nom du Point d'eau	p(17511*20318*17432*17433*17434*174-35*174-37*174-39*174-41*174-45*174-49*174-55*174-57*174-71*174-72*174-45*174-49*174-55*174-57*174-67*174-71*174-72*174-77*174-81*175-216*175-219*175-222*175-226*175-230*175-234*175-236*175-246*175-257*175-262*175-264*175-269*175-275*175-277*175-234*175-236*175-246*175-257*175-262*175-264*175-269*175-277*175-211*175-380*175-393*175-432*175-442*175-444*202-104*202-106*202-109*202-120*202-123*202-127*202-131*202-134*202-135*202-143*202-146*202-150*203-152*203-155*203-160*203-167*203-172*203-313*203-322*203-341*203-347*203-358)	P(174-67*202-137)	P(175-275*175-417*202-113)

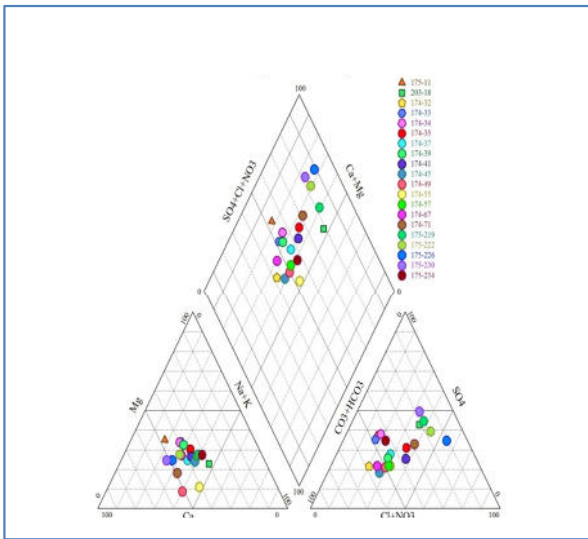


Figure -30: diagramme de piper pour les eaux souterraine de la plaine de Remila-Khenchela

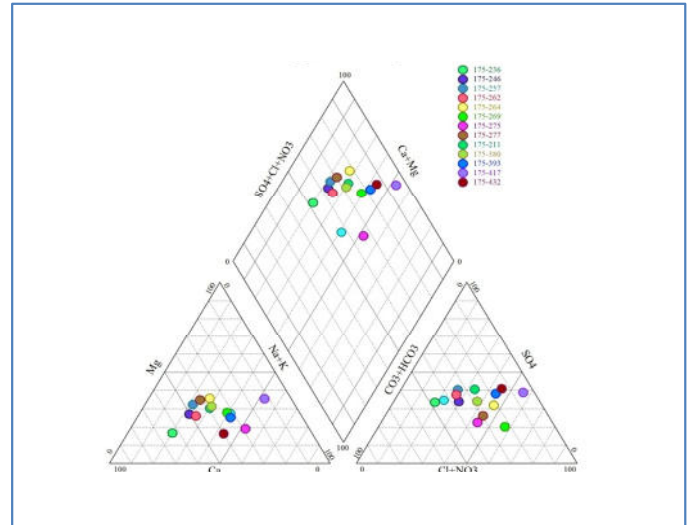


Figure-31: diagramme de piper pour les eaux souterraines de la plaine de Remila-Khenchela

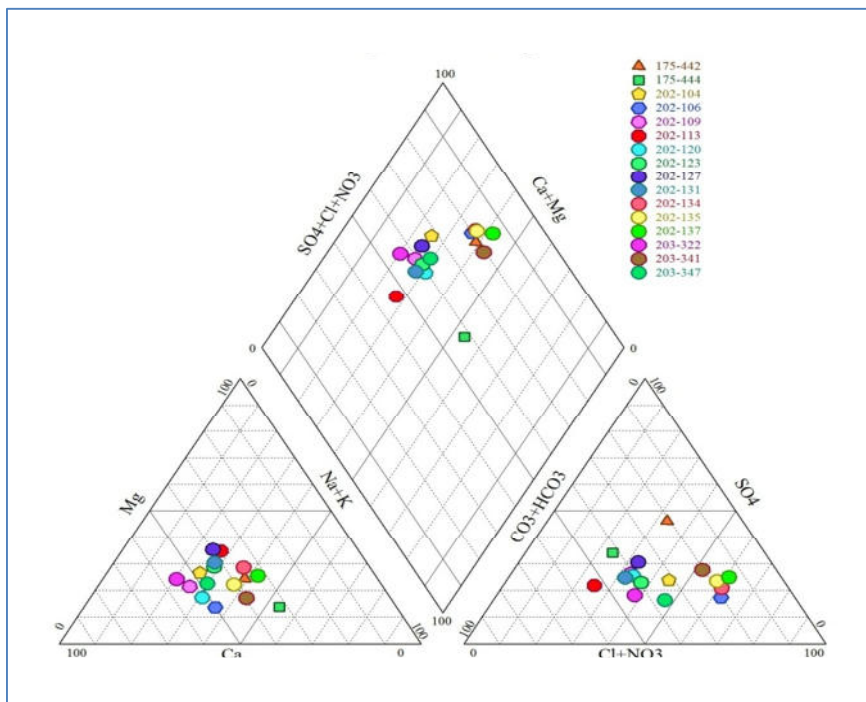


Figure -32: diagramme de piper pour les eaux souterraines de la plaine de Remila-Khenchela

Diagramme de Schoeller-Berkaloff :

Ce diagramme comporte une échelle logarithmique sur laquelle on porte les teneurs des principaux ions en (mg/l) sur l'axe des abscisses. On porte de gauche à droite, à intervalle régulier (Ca+2, Mg+2, Na++K+, Cl-, SO-4, HCO-3). Les points reportés sont ensuite reliés par une ligne brisée qui facilite la comparaison des résultats de l'analyse de l'eau d'un ensemble d'échantillons (figures -33-34-35-36)

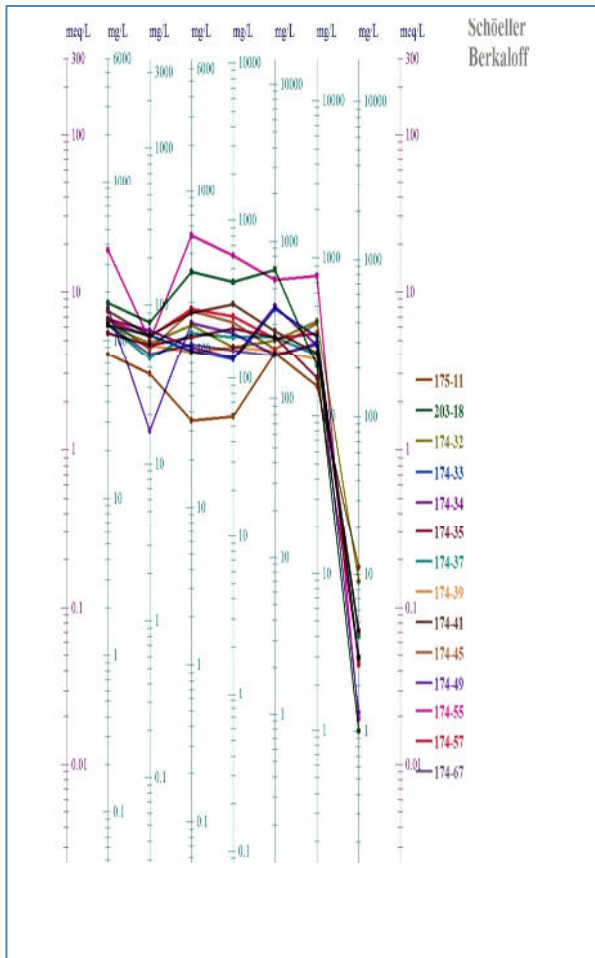


Figure-33: digramme de Scheller et Berkaloff

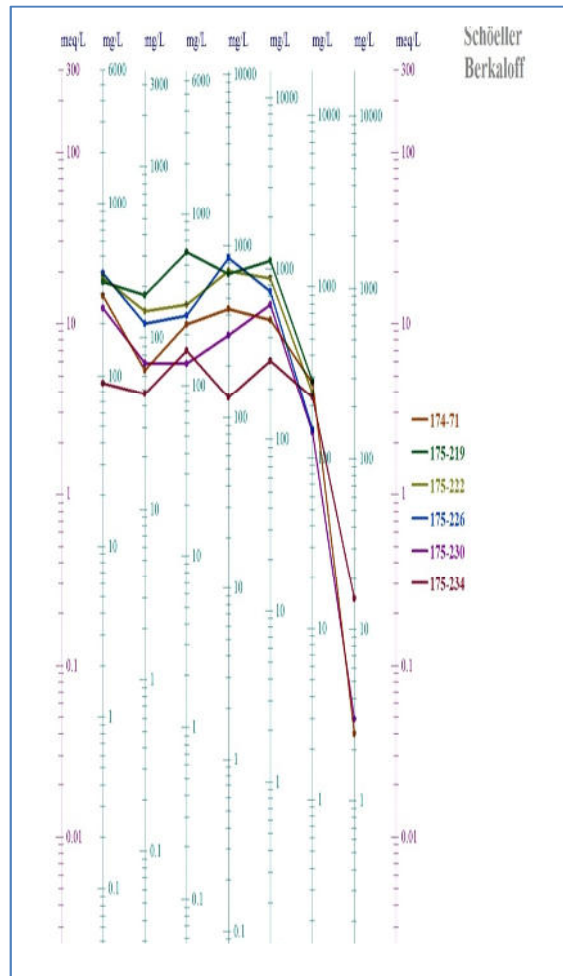


Figure- 34: digramme de Scheller et Berkaloff

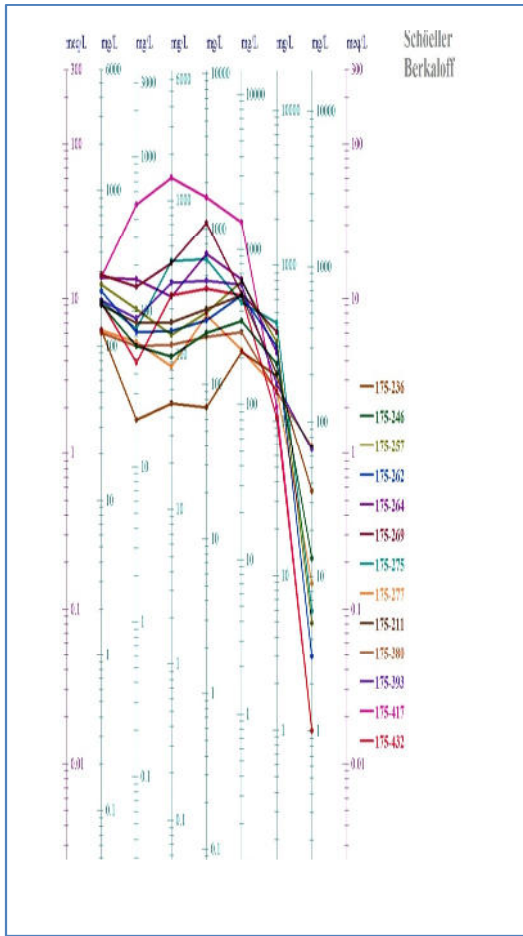


Figure-35 : diagramme de Schiller et Berkaloff

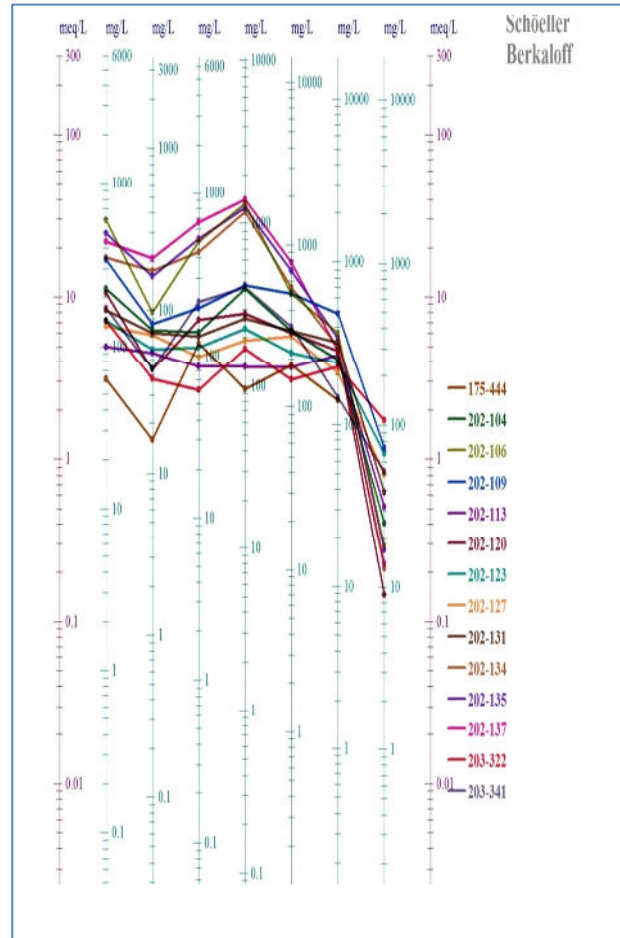


Figure -36: diagramme de Schiller et Berkaloff

2-1-2-Potabilité

Résidu sec

L'analyse du résidu sec permet notamment d'apprécier la potabilité des eaux. Ainsi, à partir du tableau N°17 et, on peut noter que 8% des eaux du système aquifère de la plaine de Rémila ont un Résidu sec compris entre 1000 et 2000 mg/l et 25 % entre 2000 et 4000 mg/l , 50 % entre 4000 et 8000mg/l et 16% supérieurs à 8000 mg/l, comme le montre le tableau précédent. Ces normes sont appliquées aux valeurs du résidu sec des eaux de la nappe de la plaine Rémila –Khenchela.

Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous

Tableau N°16: Tableau représentatif de la qualité et de la Potabilité de l'eau.

Classe	Résidu-sec en mg/l	Potabilité	%	Qualité de l'eau
1	0<.R.S.< 500	Permanente	0	Eau bonne sans Saveur particulière
2	500 R.S. 1000	Permanente	0	Eau passable a saveur Faiblement perceptible
3	1000 R.S 2000	Permanente	8	Eau médiocre a saveur peu désagréable
4	2000 <R.S.< 4000	Permanente	25.33	Eau mauvaise a saveur peu désagréable
5	4000 R.S 8000	Momentanée	50.67	Eau mauvaise a saveur peu désagréable
6	R.S 8000	Non potable	16	/

Sur la base de ces valeurs et des normes admises, on relève que seulement 8% des points d'eau présentent une bonne potabilité

2-1-3-Aptitude de l'eau à l'irrigation

Principe

La qualité d'une eau d'irrigation est définie d'après son action sur la croissance et le rendement des plantes. L'aptitude d'une eau à l'irrigation serait donc essentiellement fonction:

- de la concentration globale en sels dissous.
- de la composition de sa salure, de la proportion des ions en présence les uns par rapport aux autres.

Ainsi, le Bureau Riverside U.S.A. avait établi un diagramme dans lequel sont portés en ordonnées le S.A.R. (Sodium Adoption Ratio) et en abscisses les conductivités électriques (C.E.) exprimées en mmhos/cm à 25°C). Le S.A.R. en fonction de (rNa, rCa,rMg, ions en quantité en réaction méq/l.) est donné par l'équation:

$$\boxed{S.A.R = rNa / \sqrt{(rCa + r Mg)/2}}$$

Le diagramme (**figure-37**) est utilisé pour définir la qualité des eaux des nappes en période déficitaire en eau, quand les aquifères sont intensément sollicités pour l'irrigation des cultures d'été et d'automne (maraîchage, fourrage, arboricultures, etc)

La qualité d'une eau est observée sous un double intérêt : d'abord la tolérance des cultures aux eaux chargées ioniquement, ensuite la saturation à long terme des sols en sodium par phénomène d'échange de bases (sodium de l'eau échangé avec les cations du complexe absorbant du sol entre autre le calcium). A la limite, ce phénomène entraînerait la dégradation de la structure du sol par augmentation du ph par le sodium. Cette évolution des sols, est en rapport avec le S.A.R. Combiné à la salinité de l'eau exprimée en C.E., il permettrait de définir les limites d'admissibilité des actions salinisantes et alcalinisantes de l'eau sous forme de classes d'eaux.

Résultats et interprétation

Le tableau en Annexes fait ressortir une très large plage de classes d'aptitude de l'eau à l'irrigation définies par les cinq classes suivantes :

C3S1-C4S1-C5S1-C4S2-C5S2

Le tableau en annexes N°1 révèle que la majeure partie des classes d'eau appartiennent au type IV de la classification américaine. Le type I qualifie l'eau de « bonne pour l'irrigation » (voir figure-37) en recommandant de prendre des précautions pour les plantes sensibles telles l'arboriculture.

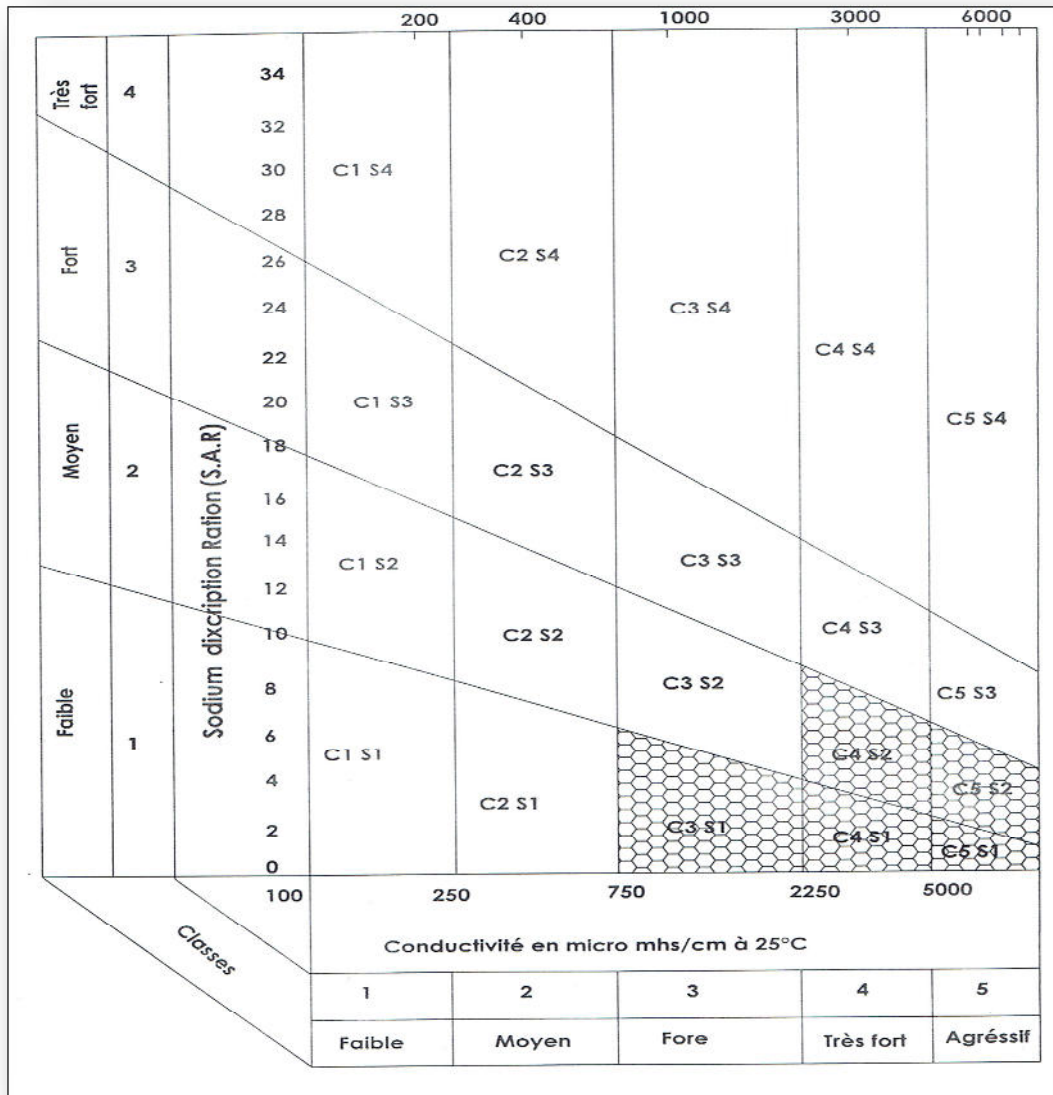


Figure-37 : Diagramme de détermination de la qualité des eaux d'irrigation

3- Distribution spatiale de paramètres hydro chimiques : cartes des conductivités électriques et des nitrates

3-1-Introduction

La qualité de l'eau est une donnée essentielle pour l'appréciation du degré de son usage en AEP, agriculture et industrie. Tel est le cas des eaux de l'aquifère de la plaine de Rémila. Aussi, dans ce rapport de synthèse, il a paru utile de présenter la carte de

distribution spatiale des données hydrochimiques. A cette fin, on a établi les cartes de distribution spatiale :

a- des conductivités électriques afin d'apprécier la distribution spatiale de la potabilité de l'eau.

b- des nitrates « indicateurs » d'une pollution organique des eaux dépassant en moyenne la norme admise de 50 mg/l, surtout au sud – est dans la partie de l'aquifère sous-jacente à Garaet El Tarf et au tour du Chott El Melah

3-2-Distribution spatiale des conductivités électriques

a- Conductivité des eaux

Une carte des conductivités a été dressée à partir des eaux des puits (figure -38) Cette carte montre que les eaux se chargent progressivement vers le nord et atteignent leur maximum de salure dans la moitié nord –est de la plaine, et notamment à proximité de la Garat et Tarf . En bordure du Djebel Fedjoudj, les eaux peu chargées indiquent qu'il y a effectivement alimentation par ce massif, mais que celle – ci est faible.

Par contre, on observe au sud deux plages de faibles conductivités qui indiquent que l'écoulement de la nappe y est important. La nappe reçoit donc une bonne alimentation des massifs du Sud. Figure-38: carte de distribution spatiale des conductivités électriques >7

La conductivité électrique mesurée exprimée en $\mu\text{mhos/cm}$ varie entre 800 et 11300, avec une moyenne de 2559 (inférieure à 3125 $\mu\text{mhos/cm}$: norme algérienne).

Il en résulte qu'en regard de la CE, la potabilité des eaux reste conforme dans la majeure partie de l'aquifère, à la norme admise ; ainsi deux zones d'inégale importance sont identifiées sur la carte :

a- Une zone de très faible conductivité électrique représentée au Sud -Ouest.

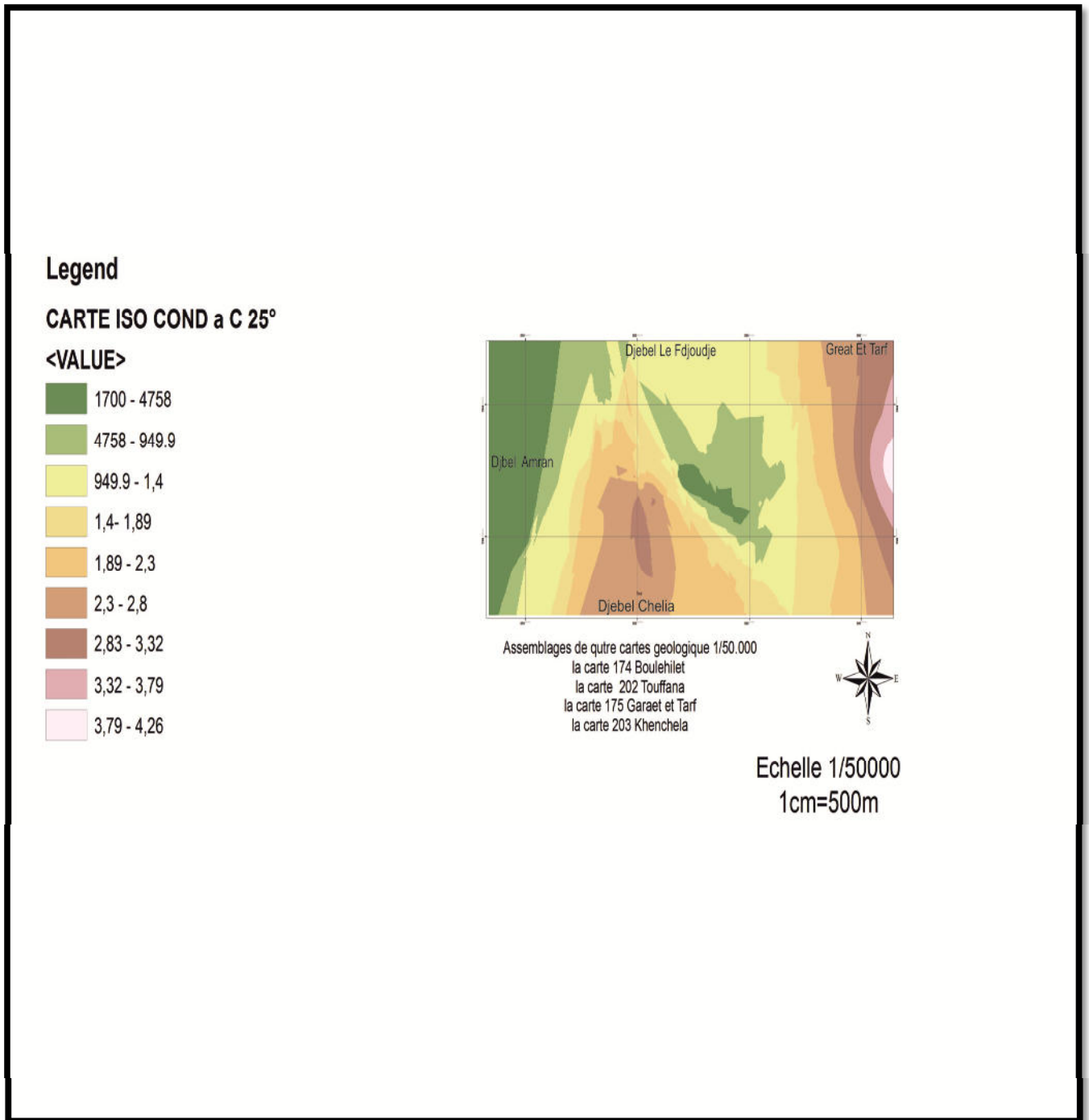


Figure-38: carte de distribution spatiale des conductivités électriques

b- Une zone de moyenne C.E équivalent forages ZK11, ZK10 , ZK3 et ZK17 occupant la majeure partie centrale de la plaine. Cette zone est orientée NO- SE.

c - Une zone bien que peu étendue accuse une très forte CE par rapport à la norme, dépassant 8gm /l limite de potabilité absolue selon Schoeller- B qui distingue une potabilité absolue indépendante des régions du climat et ne dépendant que de la physiologie humaine, et une potabilité relative dépendant de la composition chimique minima, moyenne et maxima des eaux de la région.

Pour cet auteur, la limite de potabilité absolue est de 8 g/l d'extrait sec correspondant assez voisin de l'iso tonicité du sang. « D'après J.Rodier in l'analyse chimique et physico-chimique de l'eau « DUNOD – Paris 1971 ».

3-3-Distribution spatiale des nitrates

La carte des nitrates montre deux zones d'inégale extension (figure-39):

a- Une zone de teneurs moyennes de 26 mg/l avec un minimum et maximum respectivement de 1 et 50 mg/l, a qui répond à la norme admise (inférieure ou égale à 50 mg/l). Cette zone couvre la partie Nord –Nord-Ouest de l'aquifère.

b- Au Sud –Sud Est se développe une deuxième zone où les teneurs dépassent largement et dans des proportions exagérées, la norme admise, avec un pic de 107 mg/l aux limites de Gaaret El Tarf. Dans cette zone, la moyenne est de 76 mg/l

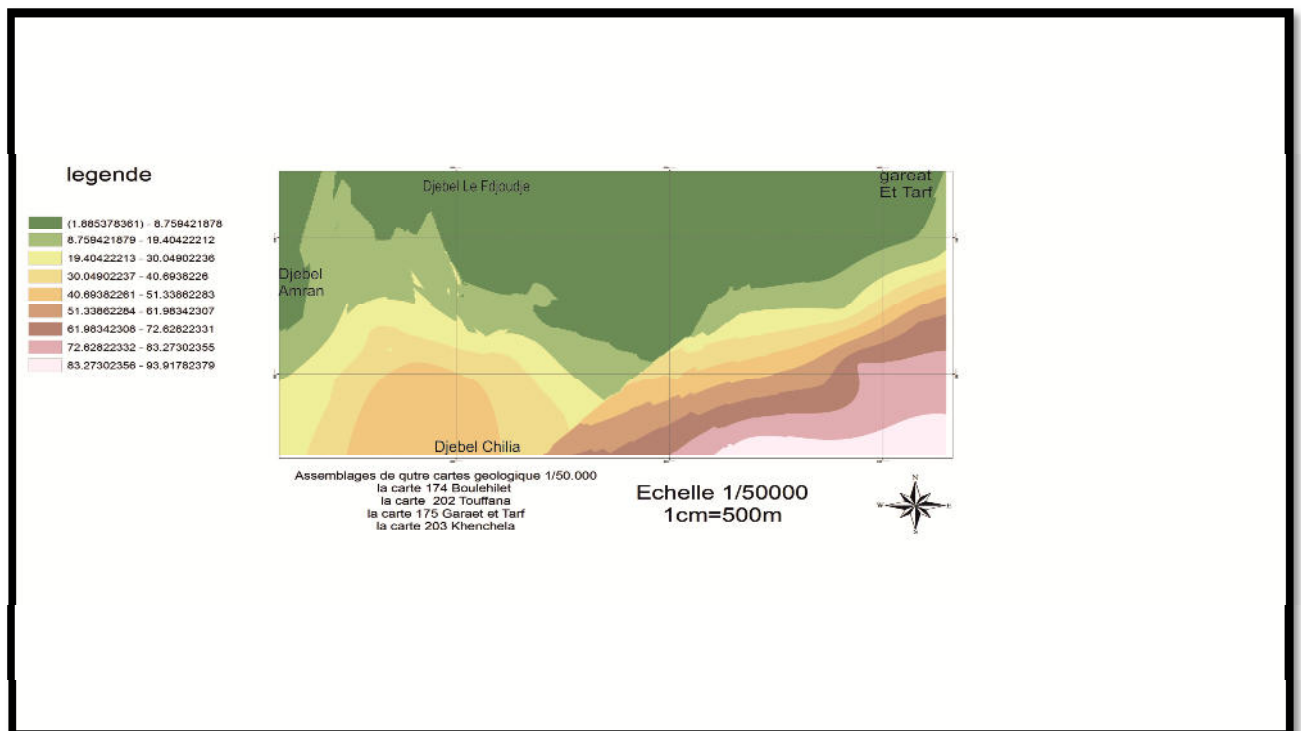


Figure -39:distribution spatiale des nitrates

4-Conclusion

D'après l'ensemble des interprétations hydro - chimiques, les faciès chimiques s'individualisent en fonction des conditions climatiques, géologiques et hydrogéologiques. Une classification des eaux de tout le système aquifère de Remila a permis de souligner les points suivants :

- Détermination de deux faciès dominant toute la région (des eaux à faciès chloruré calcique et des eaux à faciès bicarbonaté calcique).
- Une bonne alimentation à partir des massifs du Sud ; alors qu'en bordure du Djebel Fedjoudj, les eaux peu chargées indiquent qu'il y a effectivement une alimentation par ce massif, mais que celle-ci est faible qui confirme bien les conditions aux limites d'alimentation définies.

On peut considérer que les eaux de la nappe de Rémila possèdent une faible aptitude à l'irrigation. Quant à leur potabilité, on peut conclure que seulement 8% des points d'eau présentent une bonne potabilité. Toutes les teneurs se situent au-dessus des normes fixées par l'organisation mondiale de la santé. Les eaux de la majorité des puits ne peuvent donc pas servir à des alimentations en eau potable qu'après traitement chimique adéquat (adoucissement industriel ou mélange avec des eaux plus douces).

Les teneurs des nitrates dans la zone Sud –Sud Est dépassent dans des proportions exagérées la norme admise, (avec un pic de 107 mg/l aux limites de Gaaret el Tarf. Ceci indiquerait une pollution d'origine organique qu'il faudra bien surveiller par un suivi minutieux.

Chapitre 4

Schéma conceptuel, approche théorique des modèles numériques en hydrogéologie et organisation des données.

1-Approche théorique des modèles numériques en hydrogéologie

Elaboration et le calage du modèle hydrodynamique du système aquifère de la plaine de Rémilla-Khenchela à partir du modèle sous MODFLOW.

Les modèles mathématiques de simulation des écoulements souterrains (modèles hydrodynamiques) et de la propagation des polluants (modèles hydrodispersifs) sont des outils dynamiques et performants dans la gestion de la ressource en eau.

Les comportements du système aquifère permettent d'élaborer un modèle conceptuel aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire (son évolution dans le temps). Ce dernier n'est pas été réalisé à cause du manque des données chronique du débit d'exploitation.

1-1. Généralités sur les modèles numériques

Un modèle mathématique est perçu comme une schématisation déterministe ou probabiliste d'un système aquifère, par la formulation mathématique des relations entre la (ou les) impulsion (s) et la (ou les) réponse (s) du système ; avec ou sans prise en compte de ses paramètres physiques (G.Castany et J.Margat, 1977 in A. Younsi, 1994).

Dans le présent cas, nous utilisons des modèles numériques déterministes. Pour arriver à choisir le modèle le plus adéquat pour représenter les comportements du système aquifère et auquel on puisse attribuer un degré de confiance suffisant, il est nécessaire que les données traduisent aussi fidèlement que possible le système aquifère réel. Ainsi la représentation de la géométrie de l'aquifère, la répartition des caractéristiques hydrodynamiques (S et T ou K) en régime transitoire et seulement T en régime permanent) et l'imposition des conditions aux limites, doivent être représentatives du domaine à modéliser. Or, dans la réalité, il est souvent nécessaire d'ajouter aux données «objectives, des hypothèses qu'il faut évidemment justifier du mieux possible mais qui doivent toujours être considérées comme telles (M. Bonnet, 1978 in A. Younsi, 1994).

1-2- Les étapes de l'élaboration d'un modèle

1-2.1- Introduction des données

Une fois définies les conditions initiales et aux limites, on procède à la discrétisation du domaine à modéliser en un certain nombre de mailles. Il sera ensuite introduit en chaque maille les valeurs physiques du système (cotes piézométriques observées qui serviront de référence, la géométrie de l'aquifère telle les côtes du toit et du substratum, paramètres hydrodynamiques ou hydro dispersifs, débits extraits la recharge naturelle etc).

1-2.2- Calage du modèle

Le but de cette phase quantitative est de reconstituer la variation spatiale des paramètres de l'aquifère en utilisant le modèle pour affiner ces paramètres c'est-à-dire en minimisant les écarts entre les réponses du modèle (calculées) et les réponses du système (observées). Le calage étant élaboré, il permettra donc de réaliser par la suite des simulations du comportement hydrodynamique du système aquifère étudié.

1-2.3- Exploitation du modèle

Le modèle devient alors un outil d'aide à la décision dont l'importance, désormais réside dans la simulation des prévisions des réactions hydrodynamiques futures du système aquifère à des scénarios d'aménagement projeté (exploitation, sécheresse, recharge ...) ou faire des simulations de la propagation des polluants vers la nappe.

1-2.4- Types d'erreurs

Généralement, il existe quatre types d'erreurs liées à l'utilisation des modèles mathématiques :

- Les erreurs de données dues à une mauvaise connaissance des conditions initiales et aux limites régissant les écoulements souterrains.
- Les erreurs de conception incontournables générées par une mauvaise formulation du modèle ou une utilisation non appropriée de celui-ci.

- Les erreurs de troncature induites par l'utilisation d'un maillage qui ne tient pas compte des données disponibles (maillage trop fin ou trop grand) et par les méthodes de résolution des lois physiques régissant les écoulements souterrains (méthode des éléments finis ou méthode des différences finies). Les erreurs d'arrondis restent négligeables par rapport à celles définies plus haut.

2- Méthodologie des modèles numériques en hydrogéologie

Ce sont les modèles de nappes qui constituent l'outil le plus efficace, apparaissant de plus en plus souvent comme l'objectif de toute étude. Ils permettent d'améliorer les connaissances fondamentales des circulations d'eau souterraine dans une nappe aquifère, de dégager les règles pratiques utiles dans la perspective d'un projet d'exploitation rationnelle des ressources en eau et de simuler la propagation des polluants...(pollution marine par exemple...).

Ces modèles sont décrits de manière détaillée dans de nombreux ouvrages (M. Bonnet, 1978 ; Kinzelbach, 1986 ; L. Bach, 1986 ; E. Ledoux, 1986 ; J. Bear 1990).

La modélisation mathématique de nappe aquifère de type déterministe, repose sur trois lois physiques fondamentales strictement nécessaires : loi de conservation de masse, loi de Darcy et les équations d'état.

2-1- Formulation mathématique :

2-1.1- Loi de Darcy :

Pour les fluides incompressibles, l'expression mathématique du mouvement sous la forme tensorielle s'exprime par l'équation suivante :

$$\mathbf{U} = - \mathbf{K} \text{ grad } h \dots\dots\dots (1)$$

h : charge ou hauteur piézométrique, [L] :

K : tenseur de perméabilité, [L.T⁻¹] :

U : Vitesse moyenne de Darcy [L.T⁻¹]

Si l'on réduit le tenseur de perméabilité à ses composantes diagonales en choisissant les axes des coordonnées colinéaires aux directions principales du tenseur K, celui-ci s'écrit :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix}$$

La relation (1) se décompose de la manière suivante :

$$U_x = -k_{xx} \cdot \delta h / \delta x$$

$$U_y = -k_{yy} \cdot \delta h / \delta y$$

$U_z = -k_{zz} \cdot \delta h / \delta z$, avec U_x , U_y et U_z étant les vitesses moyennes de Darcy.

2-1.2- Equation de conservation de masse

L'équation de continuité exprime le principe général de la conservation de la matière au sein d'un volume fermé. Elle traduit la variation des flux entrant et sortant d'un volume élémentaire de référence (VER). Elle s'écrit, si on néglige la déformation du milieu :

$$\text{div}(\rho \mathbf{U}) + \partial/\partial t(\rho \omega) \pm \rho q = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ρ : masse volumique de l'eau [M.L⁻³] ;

U : vitesse de filtration de l'écoulement de DARCY [L.T⁻¹]

t : temps [T]

ω : Porosité du milieu poreux correspondant au rapport du volume des vides dans le VER sur le volume total (sans unité) ;

q : débit volumique d'eau prélevé (ou apportée) par unité de volume VER en chaque point.

2-1.3- Equations d'état

Indispensables pour appliquer les deux lois précédentes, les équations d'état traduisent les variations des paramètres mécaniques de l'eau en mouvement et de la matrice rocheuse (masse spécifique, viscosité ...) en fonction de la pression (M. Bonnet, 1978 et E. Ledoux, 1986 in A. Younsi, 1994)

Elles s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} d\rho / \rho = \beta \cdot dp \quad (\text{eau}) \\ \\ dv / v = -\alpha \cdot d\sigma = \alpha \cdot dp \quad (\text{matrice}) \end{array} \right. \quad (3)$$

ρ : masse volumique de l'eau [M . L⁻³] ;

α : Coefficient de compressibilité de la matrice poreuse [M⁻¹ . L . T²] ;

β : Coefficient de compressibilité de l'eau [M⁻¹ . L . T²] ;

p : pression interstitielle de l'eau [M⁻¹ . L . T²] ;

σ : Contrainte effective au sein du VER de volume v [M⁻¹ . L . T²] ;

2-1.4- Equation de diffusivité

Les trois équations (1, 2 et 3) élémentaires de la circulation de l'eau en milieu poreux (nappe libre) se combinent pour donner l'équation de diffusivité suivante :

$$\rightarrow \text{div} (K \text{ grad } h) = S_s \cdot \delta h / \delta t \pm q \quad (4)$$

S_s coefficient d'emmagasinement spécifique du milieu poreux sur tout le VER (= $\rho \cdot g (\alpha + w \cdot \beta)$), [L⁻¹]

En faisant une intégration et une linéarisation, nous obtenons l'équation de diffusivité en nappe libre suivante :

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{S}{T} \frac{\delta h}{\delta t} \pm \frac{Q}{T} \quad (5)$$

2-2- Méthode de résolution

Pour que l'équation aux dérivées partielles (5) admette une seule solution, il faut tout d'abord définir le domaine d'étude, affiner au mieux possible les paramètres structuraux caractérisant le système et déterminer les conditions initiales, avec une piézométrie

mesurée de référence et les conditions aux limites. Dès lors, deux méthodes de résolution peuvent être utilisées selon le choix des fonctions d'approximation et le type du maillage :

- la méthode des éléments finis : utilisée lorsque les fonctions d'approximation sont polynomiales de degré supérieur ou égal à 1, le maillage étant triangulaire ;
- La méthode des différences finies : lorsque l'on choisit des fonctions constantes (polynômes de degré zéro) pour fonctions d'approximation et les éléments étant en général rectangulaires ou carrés.

Dans le cas des deux méthodes, on aboutit finalement à un ou plusieurs systèmes d'équations linéaires qui admettent comme inconnues les valeurs approchées de la fonction recherchée (charge hydraulique) en un nombre donné de points (nœuds des mailles).

Nous tenterons ici de développer assez succinctement la méthode des différences finies (E. Ledoux, 1986 in A. Younsi, 1994) qui est la plus répandue en hydrogéologie.

2-2.1- Résolution par la méthode des différences finies

Cette méthode consiste à discrétiser le domaine à modéliser en mailles carrées ou rectangulaires et à rechercher une fonction constante H_i choisie en approximation de la charge hydraulique et définie sur chaque maille.

Les calculs se feront en admettant que la valeur de la charge hydraulique est attribuée au centre de la maille.

On procédera de la même façon pour les différents paramètres de l'équation, en définissant sur chaque maille :

- une transmissivité T (ou la perméabilité K_i);
- un coefficient d'emmagasinement S_i ;
- un débit total algébrique d'Entrée/Sortie (Q_i .)

En écrivant que les fonctions d'approximation satisfont localement (c'est-à-dire pour chaque maille) à l'équation de diffusivité, on obtient un système d'équations linéaires définissant les valeurs de H_i au centre des mailles.

Sachant que les calculs à l'intérieur d'une maille se feront en fonction des nœuds environnants, on isole une maille i du domaine (figure -1) avec ses quatre mailles voisines, que l'on désigne par N (Nord), S (sud), E (est) et W(Ouest) :

- Le principe de continuité qui implique la conservation du débit d'eau entrant algébriquement par les limites de la maille i se traduit par

$$Q_n + Q_s + Q_e + Q_w = Q_i + Q_{emi} \quad (6)$$

Avec Q_{emi} : débit emmagasiné dans la maille i .

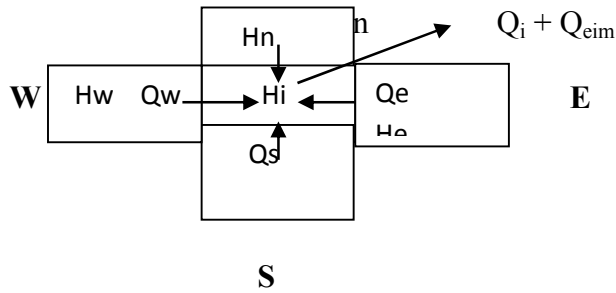


Fig 1 : bilan des flux sur une maille i .

- La loi de Darcy permet d'exprimer chaque composante du débit entrant en fonction de la transmissivité et du gradient hydraulique, ce qui s'écrit :

$$Q_n = T_n \cdot a \frac{H_n - H_i}{a} = T_n \cdot (H_n - H_i) \quad (7)$$

T_n : transmissivité de l'aquifère entre le maille i et sa voisine dans la direction Nord .

H_i et T_n : approximations de la charge respectivement sur les mailles i et N .

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

$$Q_{emi} = a_2 \cdot S_i \cdot \frac{d H_i}{d t} \quad (8)$$

S_i : coefficient d'emmagasinement sur la maille i .

Tous ces calculs permettent d'obtenir :

$$T_n (H_n - H_i) + T_s (H_s - H_i) + T_e (H_e - H_i) + T_w (H_w - H_i) = Q_i + a_2 S_i \frac{d H_i}{d t} \quad (9)$$

Si l'on applique la même équation à chaque maille du modèle, on obtient un système différentiel linéaire du premier ordre de n équations à n fonctions inconnues du temps (H_i) que nous pouvons résoudre.

Pour simplifier la présentation, on adoptera la notation matricielle suivante :

$$T \cdot H = Q + a_2 \cdot S \cdot \frac{d h}{d t} \quad (10)$$

en définissant les vecteurs :

$$\text{Piézométrie : } H = \begin{pmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_n \end{pmatrix} \text{ les débits : } Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix}$$

et les matrices T et S .

2-3 – Conditions initiales et aux limites

2-3.1- Conditions initiales

Elles sont définies par les valeurs de la charge h connue en tout point du domaine modélisé à un temps de référence $t = 0$.

Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux d'eau ou de matière entre le domaine modélisé et le milieu extérieur.

La détermination de ces conditions est nécessaire pour résoudre l'équation de la diffusivité.

2-3.2- Conditions aux limites

On connaît quatre types de conditions aux limites (G. de Marsily, 1981, in A. Younsi, 1994).

a) Limites à potentiel imposé (condition de Dirichlet) :

C'est une limite le long de laquelle la charge hydraulique est indépendante des conditions de circulation de la nappe. Ce sera généralement le contact d'une nappe avec un plan d'eau libre (mer, lac, oued ...).

b) Limites à flux imposé (condition de Neuman)

Le débit par unité de surface est constant ou nul le long d'une limite à flux imposé. On distingue les limites à flux nuls (contact de l'aquifère avec un imperméable) et les limites à flux imposé non nul matérialisées par les limites du domaine ou par les ouvrages de captage.

c) Condition de Fourier

C'est le cas d'un oued dont le fond est colmaté et qui est en communication avec une (drainage ou alimentation) nappe libre .

Par conservation du flux à la traversée de l'interface, la condition de Fourier s'écrit :

$$-K \cdot \frac{h}{n} + \frac{K'}{e'} \cdot h = \frac{K'}{e'} \cdot h_r \quad (11)$$

d) Condition de surface libre:

Deux conditions définissent une surface libre :

- Condition de potentiel :

* c'est la pression atmosphérique qui s'exerce en tout point M de la surface libre.

Exprimée en charge, elle est égale par convention à zéro et on écrit :

$$h = z \quad (12)$$

- Condition de flux :

✓ Si la nappe n'est pas alimentée par sa surface, le flux est nul et il s'écrit :

$$dh / dn = 0 \quad (13)$$

✓ Si un flux (alimentation ou évaporation) traverse la surface libre de la nappe, on a:

$$dh / dn = a \quad (14)$$

n : normale orientée vers l'extérieur.

a : est positif ou négatif (flux entrant ou sortant)

2- Conceptualisation du schéma structurel et fonctionnel des systèmes aquifères du plateau de Remila : Application du progiciel MODFLOW

La géométrie de l'aquifère étudiée et les données disponibles ont permis d'exploiter le programme de simulation Visual MODFLOW v3.0.0, mis au point par Waterloo hydrogéologie logiciels 1995-2002.

Le logiciel MODFLOW permet la représentation d'un système aquifère hétérogène à écoulement bidimensionnel linéaire avec hypothèse de Dupuit et à faible variation des épaisseurs mouillées.

2-1- Discrétisation du domaine :

Sur extension du milieu aquifère, on définit le maillage du modèle, dans chacune des mailles carrées adjacents, on admet que les caractéristiques géométriques de l'aquifère (côte du toit, côte du mur), ainsi que les paramètres hydrodynamiques (valeur de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement) sont uniformes. L'aquifère a été défini en **(34x22)** mailles carrées de 2000 m de côté (figure -40).

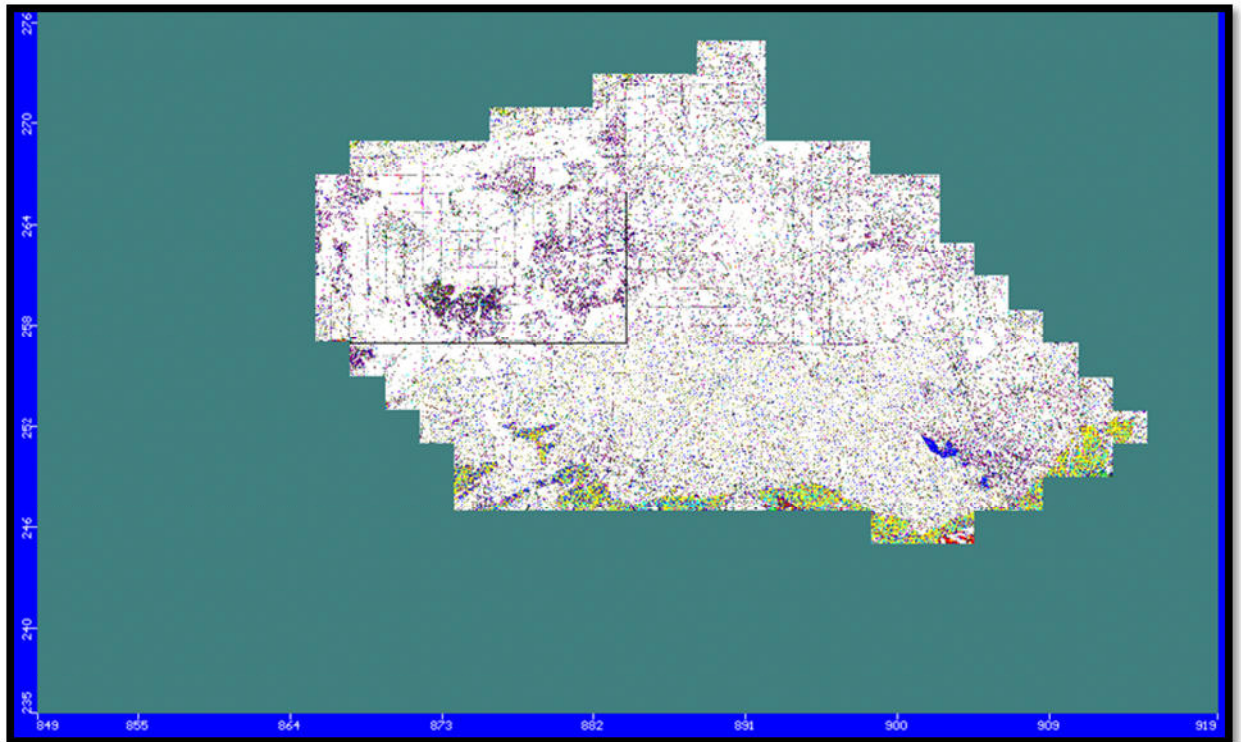


Figure -40: discrétisation de la plaine de Remila- Khenchela

-2- Données prises en compte :

Les données prises en compte concernent :

- l'état de référence qui a permis de caler le modèle en régime permanent, est la piézométrie de l'année 2000 (campagne piézométrique réalisée par ANRH) La carte en courbes iso pièzes obtenue semble en effet la mieux convenir à la reproduction d'un état stable pour les raisons suivantes :

Les perméabilités ont été déduites des transmissivités calculées à partir des essais de pompage réalisés sur 25 forages repartis dans la zone d'étude. Les perméabilités augmentent au centre de la plaine situé entre D.J Chélia au Sud et D.J. Fedjoudj au Nord ($1.9 * 10^{-4}$ m/s) ainsi elle atteint son minimum au Sud de Chott el Melah avec une valeur de $4 * 10^{-7}$ m/s.

L'infiltration efficace a été évaluée en année moyenne et pour les années : 1999 à 2014, à partir de la méthode de Thornthwaite (Tableau N11).

Les côtes du toit du substratum déterminées à partir des profils des sondages électriques. étude géophysique de la plaine Remila-Khenchla CGG1979

2-3- Etude de la recharge des aquifères par les pluies efficaces.

Calcul de l'excédent d'alimentation selon la méthode de Thornthwaite :

le calage du modèle en régime permanent s'effectue à la base d'une recharge moyenne de **33.05 mm / an** représentant les **11 %** des moyennes des pluies annuelles selon la CARTE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES DU NOR DE L'ALGERIE réalisé par ANRH (2007).

2-4- Construction et calage de modèle.

Consiste à utiliser le modèle hydrodynamique ainsi élaboré pour faire les simulations nécessaires et proposer un scénario optimum de gestion de la nappe de la plaine de Rémila.

2-4-1 - Construction du modèle (description, choix du maillage et Discrétisation d'espaces aquifère. Saisie des données numériques relatives.

1-A la géométrie.

Sur l'extension du milieu aquifère, on définit le maillage du modèle : dans chacune des mailles carrées juxtaposées, on admet que les caractéristiques géométriques de l'aquifère (côte du toit, cote du mur) : épaisseurs (figure40), ainsi que les paramètres hydrodynamiques (valeur de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement : estimé à 0.002) sont uniformes.

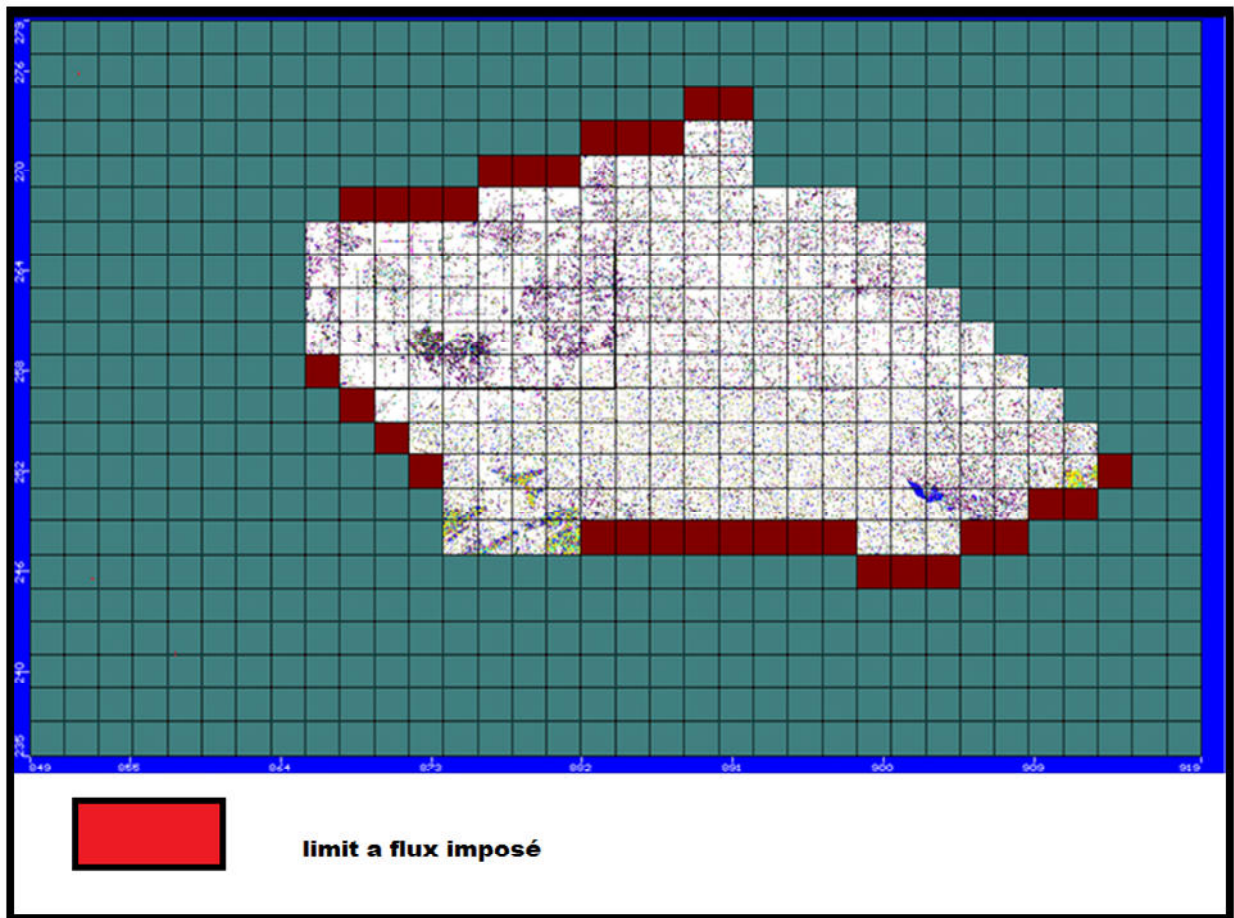


Figure -41 : les conditions aux limites de la nappe de la plaine Rémila –Khenchela

2- Aux types de limites

A titre exploration, il a été admis d'imposer dans une première phase (figure 41), des charges imposées sur toutes les limites supposées constituer des zones d'alimentation.

Afin d'orienter le calage une première l'on a calculé, les débits d'alimentation à partir de la carte piézométrique et des valeurs de T :

- ❖ Sur toute la limite Sud de la nappe.
- ❖ Sur la limite Sud –Ouest.
- ❖ Sur toute la limite Nord.

3-Aux paramètres hydrodynamiques.

Les paramètres hydrodynamiques sont la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement de 0.002 (figure -42)

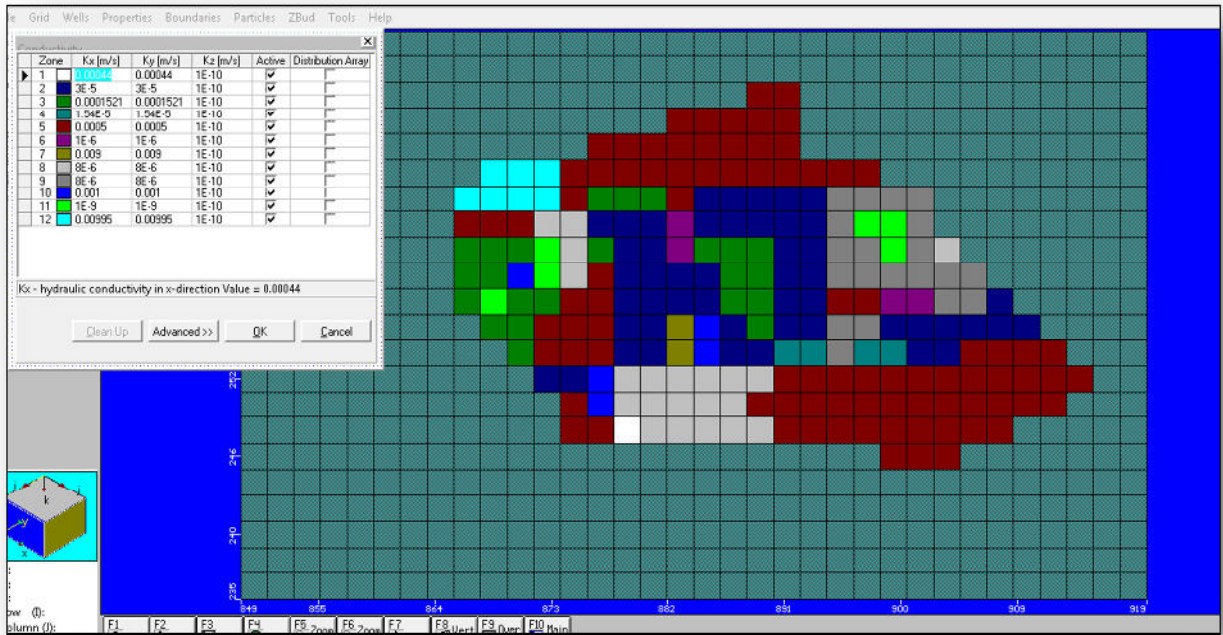


Figure -42 : perméabilité de la nappe de la plaine Rémila –Khenchela

2-5-2- Calage du modèle

2-5-2.1-En régime permanent

La carte simulée (figure- 43) montre une relative distribution de la piézométrie identique dans sa morphologie à celle observée .L'écoulement s'effectue naturellement du sud vers le nord et du nord vers le sud et une alimentation Sud-Ouest de la plaine

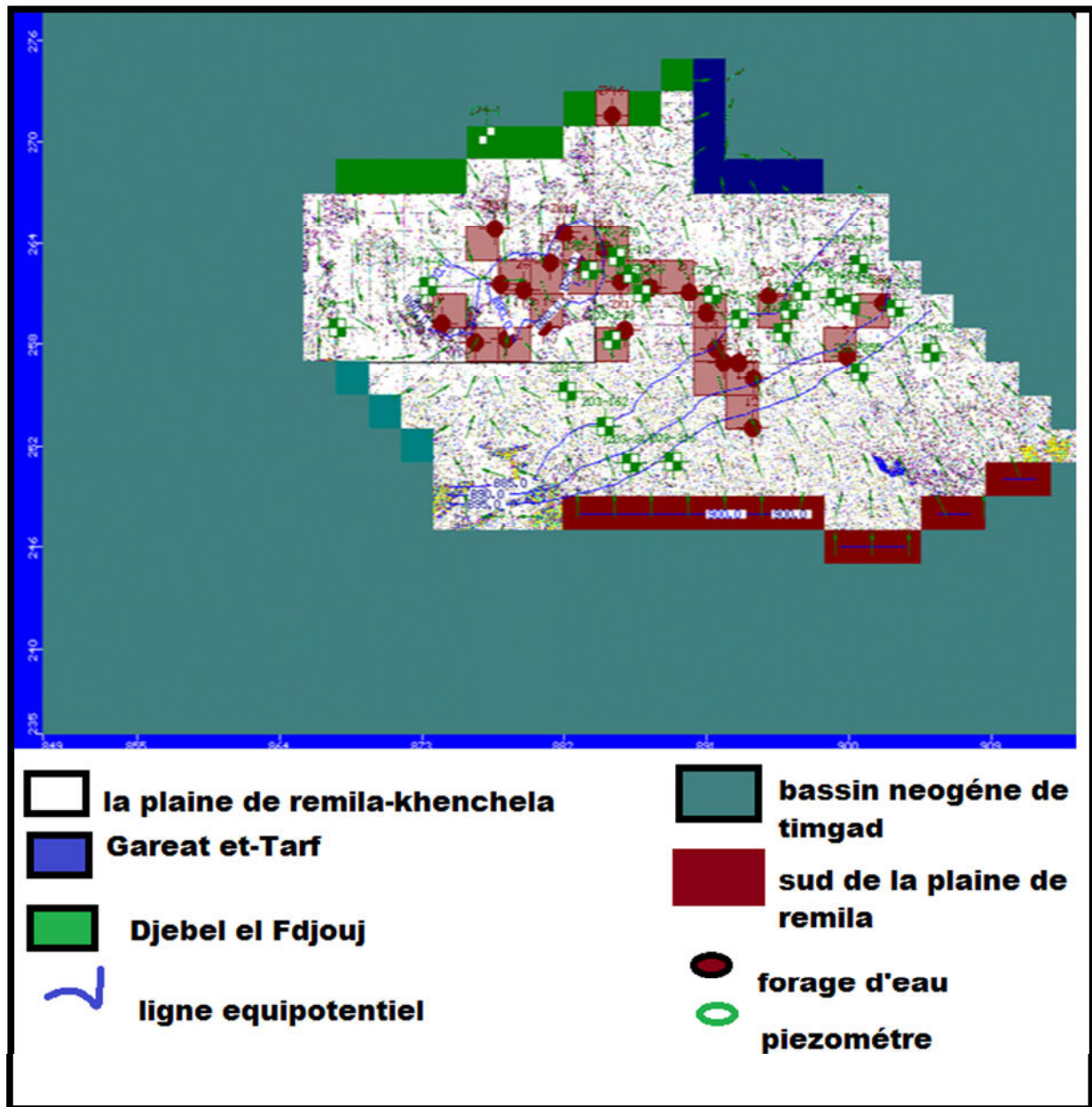


Figure-43: la piézométrie simulée régime permanent (nappe de la plaine Remila-Khenchela)

Les marécages de la Zone de Garaet et Tarf constituent un exutoire du système où l'évaporation semble manifestement très active.

Les résultats du calage sont illustrés par :

1-La figure-44 présente une droite de corrélation entre la piézométrie observée et calculée par le modèle .Les points distribués autour de la droite montre une relative vraisemblance de la distribution spatiale (associée aux conditions aux limites) de la perméabilité horizontale

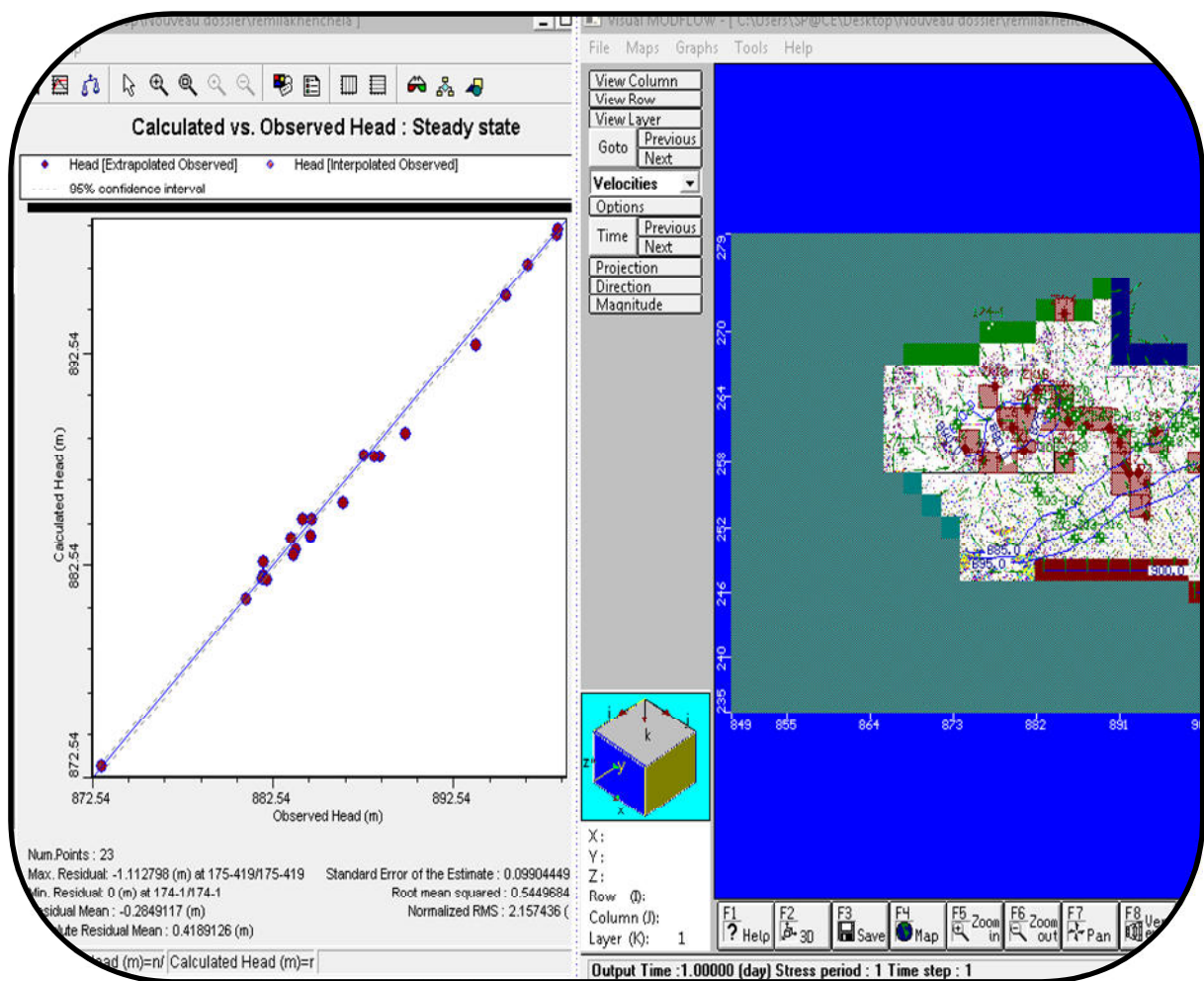


Figure -44: la droite des moindres carrés obtenue en régime permanent (nappe de la plaine de Remila-Khenchela)

2-5-3- Sensibilité du modèle (figure-45)

Nous avons essayé de tester la réponse du modèle à différentes excitations (la recharge, la puissance de la nappe, la perméabilité).

- Pour la recharge on a utilisé une valeur moyenne de 33.05 mm Son influence n'est pas très importante. Si on admet un décalage de 2 mètres minimum entre la piézométrie calculée et celle mesurée et en maintenant les autres paramètres fixes

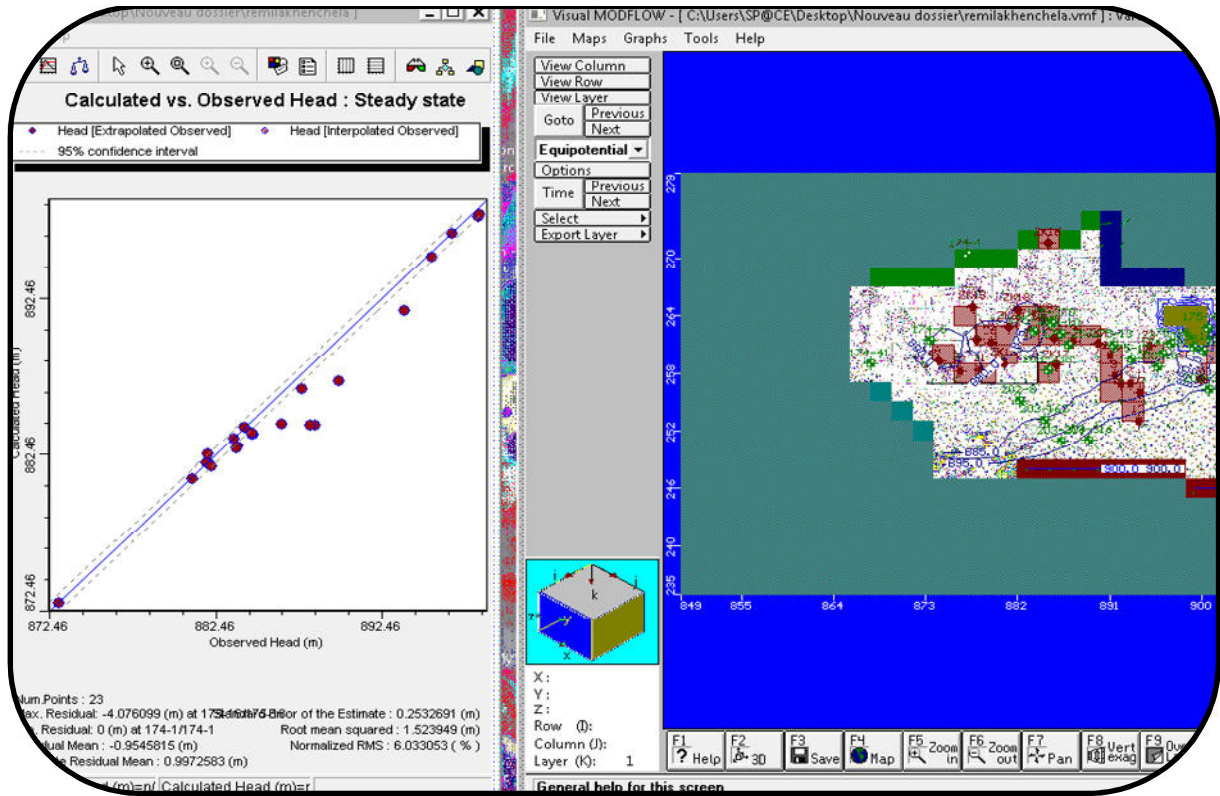


Figure -45: La droite des moindres carrés obtenue en régime permanent sous l'effet de la recharge (nappe de la plaine Remila-Khenchela) .

- La perméabilité est obtenue à partir du rapport de la transmissivité et de l'épaisseur de l'aquifère. Une sous-estimation de la perméabilité ou de la puissance de l'aquifère engendre une baisse de la valeur de la transmissivité et de ce fait l'apparition de forts gradients et une baisse du niveau piézométrique. Une baisse de 15 à 20% de la perméabilité provoque une baisse du niveau piézométrique comprise entre 5 et 10 mètres. Ce qui nous a obligé de procéder, lors du calage, à des changements de valeurs de la perméabilité comprises dans une fourchette 10^{-6} (pour les secteurs de très faible perméabilité) et $4 \cdot 10^{-4}$ m/s (pour les secteurs à fortes perméabilité).

Chapitre 5

Les programmes de développement et mobilisation de la ressource

1-Introduction

L'estimation par simulation des bilans hydriques selon différents scénarios de recharge notamment en période de sécheresse.

L'on procédera aux opérations suivantes

- Formulation des scénarios de recharge.
- Simulation des divers scénarios d'exploitation et analyse de leurs impacts sur les systèmes aquifères (effet sur la piézométrie).

2- Formulation des scénarios de recharge

Sur la période d'observation des pluies enregistrées entre **1999-2014** l'hypothèse de définition des scénarios de simulation du comportement hydrodynamique est formulée sur la base :

1-Des débits de pompages

2-Une recharge due à l'infiltration efficace 11% de la pluie moyenne annuelle

3- Bilan des aquifères selon différents scénarios d'exploitation des aquifères

Le modèle a permis de simuler les bilans hydriques de la nappe aquifère de la plaine de Remila selon les différents scénarios de recharge à partir des pluies efficaces

3-1-Analyse des bilans globaux simulés de la nappe selon les scénarios de recharge

Le tableau récapitulatif **N°19** montre que les bilans globaux différents scénarios ces bilans seraient positif sauf si il y aura une augmentation de débit d'exploitation et accuseraient un déficit. Dans cette alternative les pompages devront donc être fixés aux débits inférieur ou bien égale à **47844 m³/j** comme le montre le **tableau N°17**

Tableau N°17: Bilans globaux simulés de la nappe de la plaine de Remila. Régime permanent

	Scénario 1:Recharge minimum 18.87mm/an			Scenario 2:Recharge Moyenne 33.05mm/an			Scenario 3 recharge maximum 57.42mm/an		
	Entrée m3/day	Sortie m3/day	Difference	Entrée	Sortie	Difference	Entrée	Sortie	Difference
Potentiel imposé	714.22	-	714.22	714.22	-	714.22	714.22	-	714.22
Pompage	-	47844	-47844	-	47844	-47844	-	47844	-47844
Recharge	0.04	-	0.04	0.07	-	0.07	0.12	-	0.12
2 Vers 1	-	17364	-17364	-	17364	-17364	-	17364	-17364
3 Vers 1	22855	-	22855	22855	-	22855	22855	-	22855
4 Vers 1	8447.3	-	8447.3	8447.3	-	8447.3	8447.3	-	8447.3
5 Vers 1	33192	-	33192	33192	-	33192	33192	-	33192
Somme	65208.56	65208	0.56	65208.59	65208	0.59	65208.64	65208	0.64

Analyse des bilans en fonction de la recharge:

Afin de tenir compte des possibilités dues uniquement à la recharge dans la zone inscrite

N° (1) l'aquifère a nappe libre mio-plioquaternaire, les bilans ne permettent qu'une exploitation limitée aux conditions offertes par le climat et la capacité du réservoir eu égard à la réserve régularisable du système aquifère (zone 2 Gareat et Tarf, zone 3 Djebel el Fedjouj, zone 4 bassin Miocène de Timgad, zone 5 le sud de la plaine de Remila).

Les résultats des bilans simulés selon différentes années pluviométriques indiquent qu'au rythme d'exploitation maximum de la nappe aquifère elle ne pourrait pas assurer la mobilisation plus que **47844 m³/jour** par les forages implantés à travers la plaine de Remila. Cette remarque doit être prise en compte dans la gestion des eaux souterraines qu'il faudra minimiser l'exploitation, et de réduire alors le temps de pompages en années sèche et moyenne.

3-2- Analyse des bilans globaux simulés de la nappe selon l'effet de pompage

Tableau N°18: Bilans globaux simulés de la nappe de la plaine de Remilla. Régime permanent

	Scenario recharge maximum 57.42mm/an, optimise le debit 2 fois le debit pompée a l'OUEST de la plaine			Scenario recharge maximum 57.42mm/an, optimise le debit 2 fois le debit pompée au centre de la plaine			Scenario recharge maximum 57.42mm/an optimise le debit 2 fois le debit pompée a l'EST de la plaine		
	Entrée m3/day	Sortie m3/day	Différence M3/day	Entrée M3/day	Sortie M3/day	Différence M3/day	Entrée M3/day	Sortie M3/day	Différence M3/day
Potentiel imposé	893	-	893	801.99	-	801.99	1199	-	1199
Pompage	-	54929	-54929	-	59500	-59500	-	75170	-75170
Recharge	0.07	-	0.07	0.07	-	0.07	0.07	-	0.07
2 Vers 1	0	16996	-16996	-	16799	-16799	-	16987	-16987
3 Vers 1	24611	-	24611	27752	-	27752	34449	-	34449
4 Vers 1	8854.2	-	8854.2	10170	-	10170	21412	-	21412
5 Vers 1	37566	-	37566	37452	-	37452	35096	-	35096
Somme	71924.27	71925	-0.73	76176.06	76299	-122.94	92156.07	92157	-0.93

Optimiser le débit de pompage

Les résultats des bilans simulés selon augmentation deux fois le débit d'exploitation a différents zone de la plaine montrent que le centre de celui-ci est la plus influencé au rythme d'exploitation maximum de la nappe donc Cette remarque doit être prise en compte dans la gestion des eaux souterraines qu'il faudra minimiser l'exploitation surtout dans cette zone de la nappe de la plaine de Remila-Khenchela

4- Proposition de programme de gestion et de protection de la ressource hydrique souterraine

Les programmes de gestion devront tenir compte de l'état de la ressource en ce sens que le suivi rigoureux de l'exploitation est conditionnée par le niveau piézométrique relatif à la réserve exploitable tributaire totalement de la recharge donc du régime hydrique de l'aquifère. Un plan d'investigation complémentaire devra être élaboré pour d'abord mieux connaître les lithostructures afin d'améliorer le modèle mathématique qui a bien montré ses limites compte tenu de l'insuffisance des données, ensuite envisager à mettre en place un système de mesures et de contrôle automatique par les mesures télémétriques. Toutefois la surveillance de l'exploitation de la nappe devra se faire convenablement par des enquêtes sur les forages illicites engendrant souvent, par la dégradation tant qualitative que quantitative, la vulnérabilité de la nappe aux phénomènes de pollution.

Un état des lieux devra donc être fait visant le définissant de périmètres de protection des champs captant actuels et futurs.

Dans ce contexte il est utile de proposer des résultats d'optimisation d'exploitation de la nappe aquifère dans les conditions de recharge et de pompage.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail effectué sur les aquifères Mioplio-Quaternaire de Rémila, a mis en évidence la diversité des facteurs intervenant dans la caractérisation et l'évolution d'un tel système. Les approches utilisées, (description géologique, comportement hydrologique, la signature hydrochimique, et enfin modélisation mathématique de l'aquifère. Ceci montre la complexité de l'évolution de tels systèmes aquifères, influencés par plusieurs facteurs variés.

Dans la première partie de ce mémoire, nous nous sommes attachés à dégager, à travers une synthèse bibliographique, et une étude de terrain, les principales caractéristiques géologiques du bassin.

Après une redéfinition de la litho stratigraphie locale et régionale, que nous avons complété et corrigé. L'établissement d'une carte géologique synthétique et la réalisation de coupes géologiques a permis de définir la litho stratigraphie régionale ainsi que les grandes structures du bassin.

Sur le plan hydrogéologique, trois niveaux semblent les plus importants régionalement :

Conglomérat

Graviers

Sables

Les calcaires Aptien et turonien et les grès miocènes n'affleurent qu'en bordure du bassin et leur extension est limitée vers la plaine

Les formations du Trias essentiellement argileuses et salifères, jouent un rôle primordial. il est responsable de la salinité des eaux.

Dans la deuxième partie nous avons traité l'aspect hydro-climatologique afin de comprendre le fonctionnement des différents sous bassins. L'ETP est de 839 mm, la pluie est de 343 mm/an et l'ETR est de 310 mm

L'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines et de surface ainsi que les différentes cartes de distribution spatiale de la conductivité électrique, attestent du rôle joué par les niveaux lithologiques du Trias (argiles salifères) et l'évaporation dans la contamination et la dégradation de la qualité des eaux.

Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines montrent que, ces eaux sont de deux types:

- Eaux moins minéralisées sortant directement des niveaux carbonatés.
- Eaux salées appartenant à des zones montrant des affleurements triasiques où enrichie en inclusions évaporitiques.

L'analyse des courbes de distribution de la conductivité électrique de l'eau montre que la salinité augmente dans le sens d'écoulement des eaux

La chimie des eaux se caractérise par une grande variabilité dans le temps mais surtout dans l'espace. Elle augmente vers l'aval sous l'effet du climat aride, mais aussi des interactions eau/roche ainsi que des apports de surface et des actions anthropiques. Le faciès chimique des eaux évolue de bicarbonaté calcique près des reliefs, vers des saumures de type chloruré sodique dans les zones basses de Sebka, en passant par un faciès mixte chloruré sulfaté calcique dans les zones médianes.

L'aquifère principal, alluvial de la plaine de Remila-Khenchela, est contenu dans le remplissage quaternaire avec des nappes individualisées en un système hydrogéologique hétérogène

La nappe phréatique est contenue dans des intercalations argilo sableuse et dans des sables et graviers. La nappe profonde est constituée de conglomérats de graviers et graviers sableux d'une transmissivité de 10^{-2} m²/s. Les valeurs de la perméabilité sont comprises entre $4 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-3}$ m/s

La sebkha draine les eaux du bassin de Rémila selon un axe de direction Ouest-Est. Le gradient hydraulique est fort au sud, près des reliefs, du fait de la pente qui favorise l'écoulement sur la stagnation et faible au centre, où l'interaction eau-roche est lente et les échanges chimiques sont importants.

En fin, la gestion des eaux souterraine de la plaine a été faite par la réalisation d'un modèle mathématique qui a bien montré ses limites compte tenu de l'insuffisance des données qui nous a conduit de tester le model uniquement en régime permanent Les résultats des bilans simulés selon différentes années pluviométriques montrent qu'au rythme d'exploitation maximum de la nappe aquifère ne pourrait pas assurer la mobilisation plus que 47844 M3/jour par les forages implantés à travers la plaine de Remila. Cette remarque doit être prise en compte dans la gestion des eaux souterraines qu'il faudra minimiser l'exploitation, et de réduire alors le temps de pompages en années sèche et moyenne.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- A.B.H Constantinois-Seybousse-Mellegue. (2014)** : Rapport de synthèse
- A.N.R.H , agence national des ressources hydraulique .(2007)** : rapport de synthèse carte des ressources en eau souterraines du nord de l'algerie
- BENABBAS CHAOUKI** : évolution Mio-Plio-Quaternaire des bassins continentaux de l'Algérie nord oriental : apport de la photogéologie et analyse morphostructurale ,242 p
- Bonnet, M.** (1978) : présentation des principales équations de Transfer en milieux poreux
- BOUBELLI , S. (2009)** : Identification et mise en évidence des formations hydrogéologique de la wilaya de KHENCHELA (NORD-EST ALGÉRIEN) analyse et synthèse des données
- CASTANY, G. (1982)**: Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Ed. Dunod, 263 p.
- CGG ,(1979)** : étude géophysique de la plaine de Remila-Khenchela
- GAUD, B. (1975)**: Etude hydrogéologique du système aquifère Annaba-Bouteldja. Synthèse des connaissances et recherche des conditions de modélisation. Rapport ANRH, Annaba, 2 vol., 10 planches, 230 p.
- GLAÇON, G. et GUIRAUD, R. (1970)**: La série Mio-pliocène du Hodna et des régions voisines (Algérie du Nord). CRAS, Paris, t. 271, pp. 945-948.
- GUIRAUD, R. (1975)**: L'évolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. "Extrait de la revue de géographie physique et de géologie dynamique". Vol. XVII, Fasc. 4, pp. 427-446.
- GUIRAUD, R. (1973)**: Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Doc., Univ. Nice, 270 p.
- GUIRAUD, R. (1968)**: Le Plio-Quaternaire du bassin du Hodna (Algérie du Nord). CRAS, Paris, t.267, pp. 561-564.
- GUIRAUD, R. (1965)**: Géologie et hydrogéologie du Bassin du Hodna, Résumé des connaissances actuelles. Publ. Serv. Géol. Algérie, Bull. n° 33, Alger 1966
- HOUHA, B. (2007)** : Etude du fonctionnement hydrogéologique et salin d'un bassin semi-aride. Rémila – Khenchela. Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba
- Ledoux, E.** (2003) : Modelés mathématiques en hydrogéologie, 133p

LAFFITE, R. (1939) : Etude géologique de l'Aurès. Bull. Serv. Carte géol. Algérie (2), Bull, N° 15,484p

McDonald et Harbaugh (1983) : logiciel de modélisation ; Modflow (U.S. Geological Survey)

MEBBARKI : apports hydrologiques des cours d'eau dans les contextes variés de leurs bassins, bilans de l'écoulement et cartographie automatique de leurs principales composantes, protection des hydrosystèmes - combien vulnérables en régime d'étiage - et aménagement des eaux de surface par le biais de barrages-réservoirs, 360p.

VILA, J M. (1977): Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°174, Boulhilet, (Luthau), avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal et Vila J-M.). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.

VILA, J M. (1977): Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°175, Garet et Tarf, avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal et. Vila J-M). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.

VILA, J M. (1977): Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°202, Touffana, avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.

VILA, J M. (1977): Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000, feuille n°203, Khenchela, avec notice explicative détaillée (levés de M. Mégartzi et S. Guellal). Serv. Carte géol., Algérie/SONATRACH.

Sites Internet

Sites Internet

<http://fr.wikipedia.org>

<http://www.Aureschaouia.free.fr>

<http://www.CGM.com>

<http://www.cig.ensmp.fr>

<http://www.hydrogéologie.com>

<http://www.u-picardie.fr>

<http://www.cuniv-khenchela.edu.dz>

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Khenchela.](http://fr.wikipedia.org/wiki/Khenchela)

Annexe

Annexe 1

N	nom	Ca++ mg/l	Mg(mg/l)	Na(mg/l)	K(mg/l)	CO3H(mg/l)	SO4(mg/l)	Cl(mg/l)	NO3 (mg/l)	résidu-sec(mg/l)	Conductivité mmohm/cm a 25C°	S.A.R
1	175-11	80	36	34	1	153	194	57	11	12500	2.7	0.79
2	203-18	172	79	306	1.4	207	668	415	1	4218.75	1.4	4.84
3	174-32	124	58	122	21	403	238	160	9	2187.5	1.4	2.27
4	174-33	124	65	96	1	323	378	131	3	2187.5	1.5	1.74
5	174-34	136	70	102	1	281	390	135	3	2343.75	1.5	1.77
6	174-35	110	56	116	4	171	250	209	2.9	2343.75	1.5	2.24
7	174-37	124	46	120	6	244	248	185	4.1	2343.75	1.3	2.34
8	174-39	110	56	92	4	226	202	160	4.2	2031.25	1.9	1.78
9	174-41	152	65	164	6	250	274	298	4.4	2968.75	1.7	2.80
10	174-45	136	53	152	22	390	210	231	0	2656.25	1.4	2.80
11	174-49	158	16	136	10	287	192	195	1.3	2187.5	4.2	2.76
12	174-55	364	60	436	86	775	576	607	1.2	6562.5	1.8	5.58
13	174-57	134	64	168	11	336	244	252	2.7	2812.5	1.3	2.99
14	174-67	126	49	100	7	293	190	153	4.4	2031.25	2.7	1.91
15	174-71	292	65	220	6	275	500	433	2.5	4218.75	4.6	3.03
16	175-219	352	178	314	5	281	1110	689	0	7187.5	4.1	3.40
17	175-222	372	144	282	13	238	880	721	0	6406.25	4	3.14
18	175-226	396	122	248	7	146	860	738	0	6250	2.3	2.79
19	175-230	248	72	132	2	140	620	302	3	3593.75	1.3	1.90
20	175-234	90	47	98	62	226	292	131	15	2031.25	0.9	2.08
21	175-236	126	20	42	7	195	220	71	35	1406.25	1.7	0.92
22	175-246	184	60	94	3	232	344	213	13	2656.25	2.5	1.54
23	175-257	246	104	130	5	323	620	288	5	3906.25	2.2	1.75
24	175-262	224	74	138	5	299	500	259	3	3437.5	1.5	2.04
25	175-277	126	64	80	4	159	224	277	9	2343.75	1.3	1.45
26	175-234	90	47	98	62	226	292	131	15	2031.25	0.9	2.08
27	175-236	126	20	42	7	195	220	71	35	1406.25	1.7	0.92
28	175-246	184	60	94	3	232	344	213	13	2656.25	2.5	1.54
29	175-257	246	104	130	5	323	620	288	5	3906.25	2.2	1.75
30	175-262	224	74	138	5	299	500	259	3	3437.5	3.5	2.04
31	175-264	272	161	232	5	275	640	685	0	5468.75	4100	2.75
32	175-269	284	146	388	2	372	1100	522	0	6406.25	3000	4.66
33	175-275	192	77	396	7	427	452	643	6	4687.5	1500	6.10
34	175-277	126	64	80	4	159	224	277	9	2343.75	2200	1.45
35	175-211	182	85	160	2	201	500	302	0	3437.5	1500	2.45
36	175-380	120	62	102	14	153	294	202	69	2343.75	2800	1.88
37	175-393	196	91	290	1	171	588	462	66	4375	9200	4.29
38	175-417	278	496	1380	19	122	1500	1600	1	14375	2300	11.47
39	175-432	190	47	232	9	104	500	410	1	3593.75	2500	3.90
40	175-442	184	74	222	4	177	628	330	0	3906.25	900	3.49

Modélisation de la plaine de Remila-Khenchela

41	175-444	62	16	116	4	140	180	95	0	1406.25	2000	3.40
42	202-104	226	76	136	5	250	298	401	25	3125	5300	2.00
43	202-106	596	98	484	18	366	500	1321	18	8281.25	2900	4.84
44	202-109	342	83	172	25	482	500	419	72	4531.25	1100	2.16
45	202-113	100	55	80	5	268	176	131	32	1718.75	1800	1.59
46	202-120	212	43	116	50	287	288	280	9	2812.5	1500	1.90
47	202-123	144	58	106	6	238	220	227	67	2343.75	1500	1.88
48	202-127	134	71	90	9	207	276	192	50	2343.75	1800	1.56
49	202-131	166	73	120	12	323	296	263	39	2812.5	4800	1.95
50	202-134	352	175	424	9	305	550	1179	13	7500	5200	4.61
51	202-135	494	164	520	5	342	690	1264	17	8125	5800	5.18
52	202-137	438	208	646	15	287	786	1416	14	9062.5	1200	6.36
53	203-322	144	38	60	1	226	148	170	107	1875	2000	1.15
54	203-341	170	44	210	3	146	314	408	52	3125	1000	3.71
55	203-347	106	30	72	5	134	96	153	92	1562.5	1000	1.59

Annexe 2

N	X	y	NS	Cote piézométrique
p175021	903,75	260,75	3,98	841,17
p175021	899,175	262,8	1,93	847,99
p17402	865,8	268,5	28,4	831,95
p17509	855,55	261,73	0,54	857,92
p175019	906,45	261,45	8,54	851,7
p175017	899,75	259,55	2,32	851,21
p175015	897	261,15	1,7	848,54
p174023	896,2	260	2,4	856,15
p175013	891,35	260,95	4,52	852,39
p175010	886,25	262,15	2,75	857,12
p20208	882,2	255,15	15,92	869,2
p17404	874,3	259,2	14,62	845,53
p17401	876,651	271	17,94	830,62
p203018	895,78	258,65	9,47	860,51
p175012	893,1	259,45	8	849,38
p17406	873,4	261,45	5,2	865,14
p1750411	905,9	264,08	2,45	847,67
p1750403	905,175	257,5	9,74	951,65
p1750417	902,05	263,2	0,54	850,91
p1750419	900,65	262,75	3,53	850,29
p1750393	902,95	260,15	4,14	850,57
p2030355	900,7	256,35	9,97	880,04
p174067	872,8	259,3	14,96	875,65
p1750425	900,15	260,4	3,17	850,72
p1750256	886,95	261	7,13	852,96
p1750270	885,35	263,13	2,11	856,92
p1750215	883,6	262,4	3,85	855,43
p2030162	884,625	253,18	10,3	889,75
p174041	867,625	259	16	883,03
p2030238	885,025	258,25	11,53	859,66
p2030314	886,225	250,95	11,65	999,75
p2030316	888,92	251,03	8,68	940,21
p2030320	890,25	251,65	20,75	913,64
p2030326	898,15	252,9	13,98	907,12

