

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



LABORATOIRE DE RECHERCHE EN HYDRAULIQUE APPLIQUEE
(LARHYA)

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER en HYDRAULIQUE
Option : Construction hydro – technique et environnement
(Mobilisation des ressources hydriques et leur impact sur l'environnement)

Thème :

***L'IMPACT DE L'ACTIVITE AGRICOLE ET
URBAINE SUR LA QUALITE DES EAUX
SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE
GADAIN - AIN YAGHOUT
(EST ALGERIEN)***

Présenté par :
DIB IMENE

(Ingénieur d'état en Hydrogéologie)

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Président : Dr. LAHBARI Nouredine
Rapporteur : Pr. BOUDOUKHA Abderrahmane
Examineur : Dr. CHABOUR Nabil
Examineur : Dr. ROUABHIA Abdelkader

M.C. Université de Batna
Pr. Université de Batna
M.C. Université de Constantine
M.C. Université de Tébessa

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire et en particulier :

- ✚ Mr. Boudoukha Abderrahmane, Professeur à l'université de Batna, qui a accepté de diriger ce travail, je lui exprime mon profond respect.
- ✚ Mr. Lahbari Noureddine, qui a la bienveillance d'accepter de juger ce travail et de le présider. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude.
- ✚ Mr. Chabour Nabil, Maître de conférence à l'université de Constantine pour sa participation de juger ce travail.
- ✚ Mr. Rouabhia Abdelkader, Maître de conférence à l'université de tebessa, pour avoir bien voulu juger ce travail.

Il m'est également très agréable de remercier l'ensemble de mes amies pour l'aide qu'elles m'ont apporté : Hallouma, Wahiba, Amina...

Mes plus vifs remerciements vont plus particulièrement à mes chers parents et frères et mon époux qui ont supporté mes préoccupations et mon stress, je leur dédie ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : SITUATION GEOGRAPHIQUE

1.1. Situation géographique	2
I.2. Géomorphologie.....	3
I.3. Réseau hydrographique	3
I.4- Climat	4
I.5-Couvert végétal	4
I.6.Aperçu socio-économique	4
I.6.1.population.....	4
I.6.2.Agriculture	4
Conclusion	5

CHAPITRE II : GEOLOGIE

Introduction	6
II.1. La géologie régionale	6
II.1.1. Domaine interne.....	6
II.1.2. Domaine médium.....	6
II.1.3. Domaine externe.....	7
II.2. Géologie locale.....	9
II.2.1. Analyse litho stratigraphique.....	9
II.2.1.1. Formations peu ou pas tectonisées.....	9
II.2.1.2. Ensemble allochtone sud Sétifien	11
II.2.1.3. Ensemble parautochtone et autochtone aurésien.....	12
II.2.1.4. Trias exotique ou extrusif.....	13
II.3. Analyse tectonique et structurale.....	15
II.3.1. Principales phases tectoniques.....	15
II.3.2. Coupes géologiques.....	17
II.4. Karstification.....	17
II.5. Paléogéographie.....	17
Conclusion	19

CHAPITRE III : GEOPHYSIQUE

Introduction	20
III.1. Problèmes et objectifs de l'étude de la C.G.G	20
III.2. Travaux effectués	20
III.2.1. Répartition des sondages électriques	20
III.2.2. Echelle de résistivité.....	20
III.3. Examen des résultats et interprétation.....	20
III.3.1. Coupes géo-électriques.....	22
III.3.2. Carte de résistivité en ligne AB = 1000 m.....	22
III.3.3. Carte de résistivité en ligne AB = 3000 m.....	24
III.3.4. Carte de surface.....	24
III.3.5. Carte du substratum.....	24
Conclusion	27

CHAPITRE IV : HYDROCLIMATOLOGIE

Introduction	28
--------------------	----

IV.1. zone d'étude et réseau hydroclimatique	28
IV.2. Analyse des paramètres climatologiques.....	28
IV.3. Evapotranspiration	41
IV.4. Bilan hydrologique	46
IV.4.1. Ruissellement superficiel	46
IV.4.2. Infiltration	47
Conclusion	47

CHAPITRE V : HYDROELOGIE

Introduction	48
V.1. Aquifère superficiel d'âge Mio-Plio-Quaternaire.....	48
V.1.1. Description des formations aquifères.....	48
V.1.2. Alimentation	48
V.1.3. Exutoire	48
V.1.4. Conditions aux limites.....	48
V.1.5. Etude piézométrique.....	49
V.1.5.1. Inventaire des points d'eau.....	49
V.1.5.2. Interprétation des cartes piézométriques.....	50
V.2. Complexe aquifère profond.....	52
V.2.1. Description des formations aquifères.....	52
V.2.2. Alimentation.....	52
V.2.3. Sorties.....	52
V.2.4. Bilan hydrogéologique.....	53
V.2.5. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe.....	53
V.2.5.1. Expérimentations des pompages d'essais.....	54
V.2.5.2. Interprétation des pompages d'essais.....	54
Conclusion	57

CHAPITRE VI : HYDROCHIMIE

Introduction.....	58
VI.1. Etude des paramètres physiques et l'oxygène dissous	58
VI.1.1. Température.....	58
VI.1.2. Potentiel d'hydrogène.....	58
VI.1.3. Conductivité électrique.....	61
VI.1.4. L'oxygène dissous.....	63
VI.2. Les faciès chimiques.....	63
VI.2.1. Formule caractéristique de STABLER... ..	63
VI.2.2. Diagramme de PIPER.....	65
VI.2.3. Diagramme de SCHOELLER – BERKALOFF.....	65
VI.3. Cartographie hydrochimique.....	69
VI.3.1. Cartes du calcium	69
VI.3.2. Cartes du magnésium.....	69
VI.3.3. Cartes du sodium et du potassium.....	69
VI.3.4. Cartes des chlorures	73
VI.3.5. Cartes des sulfates.....	73
VI.4. Etude de l'origine des éléments dominants et les rapports caractéristiques.....	76
VI.4.1. Origine des éléments Na^+ et Cl^-	76
VI.4.2. Les rapports caractéristiques	78
VI.4.2.1. La relation $r \text{HCO}_3^- / r (\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-) - \text{conductivité électrique}$	78
VI.4.2.2. La relation $r \text{Cl}^- / r \text{SO}_4^{2-} - \text{conductivité électrique}$:.....	79
VI.5. Indice d'échange de base (i.e.b)	80
VI.6. Qualité chimique des eaux	80
VI.6.1. Potabilité des eaux	80

VI.6.1.1. Normes selon l'O.M.S	80
VI.6.1.2. Normes selon le degré hydrométrique totale (D.H.T).....	81
VI.6.2. Aptitude à l'irrigation	81
VI.6.2.1. Salinité.....	82
VI.6.2.2. Infiltration	83
VI.6.2.2.1. Eaux peu salées	83
VI.6.2.2.2. Eaux à forte teneur en sodium.....	83
VI.6.2.2.2.1. Classification de Richards.....	83
VI.6.2.3. Etude de la toxicité des végétaux.....	85
VI.6.2.3.1. Sodium.....	85
VI.6.2.3.1.1. Classification de Wilcox	86
VI.6.2.3.2. Chlore.....	86
VI.7. Effet de la pollution sur la qualité chimique des eaux	87
VI.7.1. Introduction	87
VI.7.2. Principales sources de pollution dans la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout.....	88
VI.7.3. Résultats des analyses hydrochimiques des éléments polluants	89
VI.7.4. Cartographie des éléments polluants	90
VI.7.4.1. Les éléments nutritifs.....	90
VI.7.4.2. Les métaux lourds.....	94
VI.8. Analyse en composantes principales (A.C.P).....	99
VI.8.1. Principe	99
VI.8.2. Résultats et interprétations.....	99
VI.8.3. Application de l'A.C.P aux données chimiques (éléments majeurs) des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout.....	100
VI.8.3.1. Analyse statistique.....	100
VI.8.3.2. Matrice de corrélation.....	101
VI.8.3.3. Etude des variables et des individus.....	101
VI.8.4. Application de l'A.C.P aux données chimiques (éléments polluants) des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout.....	102
VI.8.4.1. Analyse statistique.....	102
VI.8.4.2. Matrice de corrélation.....	104
VI.8.4.3. Etude des variables et des individus.....	104
CONCLUSION.....	106
CONCLUSION GENERALE	107
BIBLIOGRAPHIE	109
ANNEXES	113

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Situation de la zone d'étude dans les principaux ensembles géomorphologique du Nord de l'Algérie	2
Figure I.2 : Réseau hydrographique de la plaine de Gadaïne - Ain Yaghout	3

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Esquisse structurale du Nord Est Algérien, (W. Wildi, 1983).....	8
Figure II.2 : Carte géologique de la plaine de Gadaïne - Ain Yaghout. (D'après J.M.Vila, 1977)..	10
Figure II.3 : Schéma structural simplifié de la de la plaine de Gadaïne - Ain Yaghout. (Extrait des cartes géologiques aux 1/50000 de : Ain Yaghout et Ain El ksar).....	16
Figure II.4 : Coupes géologiques interprétatives. (D'après J.M.Vila, 1977)	18

CHAPITRE III :

Figure III.1 : Carte de situation des sondages électriques (D'après la C.G.G).....	21
Figure III.2 : Coupes géoélectriques (E, G, I, K et M), (D'après la C.G.G)	23
Figure III.3 : Carte de résistivité en ligne (AB = 1000 m)	25
Figure III.4 : Carte de résistivité en ligne (AB = 3000 m)	25
Figure III.5 : Carte de surface	26
Figure III.6 : Carte du substratum (D'après la C.G.G)	26

CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : Grands bassins versants de l'Algérie.....	29
Figure IV.2 : Carte de sous bassins des Hauts Plateaux Constantinois (07) (D'après l'Agence de Bassin Hydrographique Constantinois-Seybousse-Mellegue).....	29
Figure IV.3 : Précipitations moyennes mensuelles aux stations de : Ain Yaghout et Ain Skhouna.	31
Figure IV.4 : Précipitations moyennes saisonnières aux stations de : Ain Yaghout et Ain Skhouna.....	31
Figure IV.5 : Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord	32
Figure IV.6 : Précipitations annuelles aux stations de : Ain Yaghout et Ain Skhouna.	33
Figure IV.7 : Calcul de la lame d'eau précipitée par la méthode de THIESSEN.....	35
Figure IV.8 : Calcul de la lame d'eau précipitée par la méthode des isoyhetes.....	35
Figure IV.9 : Diagramme Ombrothermique de la station d'Ain Skhouna.....	37
Figure IV.10 : Climagramme d'EMBERGER	39
Figure IV.11 : Abaque de WUNDT modifier par COUTAGNE	44
Figure IV.12 : Abaque de VERDEIL.....	44

CHAPITRE V :

Figure V.1 : Carte d'inventaire des points d'eau	49
Figure V.2 : Carte piézométrique de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout (Mai 2009)	51
Figure V.3 : Carte piézométrique de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout (Sept 2009)	51
Figure V.4 : Variation spatio-temporelle de la piézomètre.....	52
Figure V.5 : Courbe de descente (Forage d'Ain Yaghout centre)	56
Figure V.6 : Courbe de remontée (Forage d'Ain Yaghout centre)	57

CHAPITRE VI :

Figure VI.1 et VI.2 : Carte du pH (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	60
--	----

Figure VI.3 et VI.4 : Carte de conductivité de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	62
Figure VI.5 et VI.6 : Carte d'oxygène dissous dans les eaux souterraines de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	64
Figure VI.7 : Diagramme d'analyse des eaux souterraines de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout selon la méthode de PIPER	66
Figure VI.8 et VI.9 : Représentation graphique des analyses d'eau de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout d'après SCHOELLER-BERKALOFF (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	67
Figure VI.10 et VI.11 : Carte d'isoteneur en calcium (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009)...	70
Figure VI.12 et VI.13: Carte d'isoteneur en magnésium (mg/l) (Compagnes de Mai et Sept 2009)	71
Figure VI.14 et VI.15: Carte d'isoteneur en sodium et potassium (mg/l) (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	72
Figure VI.16 et VI.17: Carte d'isoteneur en chlorure (mg/l) (Compagnes de Mai et Sept 2009)...	74
Figure VI.18 et VI.19: Carte d'isoteneur en sulfate (mg/l) (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	75
Figure VI.20 et VI.21: Carte d'isoteneur en bicarbonate (mg/l) (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	77
Figure VI.22 et VI.23 : Origine des éléments Na^+ et Cl^- (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	78
Figure VI.24 et VI.25 : L'origine de la salinité en fonction du rapport caractéristique $r \text{HCO}_3^- / r (\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$, (Compagnes de Mai et Sept 2009)...	78
Figure VI.26 et VI.27 : L'origine de la salinité en fonction du rapport caractéristique $r \text{Cl}^- / r \text{SO}_4^{2-}$, (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	79
Figure VI.28 : Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation en fonction de S.A.R	84
Figure VI.29 : Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation selon la méthode de Wilcox	87
Figure VI.30 et VI.31: Carte d'isoteneur en nitrate (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	91
Figure VI.32 et VI.33 : Carte d'isoteneur en nitrite (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	92
Figure VI.34 et VI.35: Carte d'isoteneur en ammonium (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	93
Figure VI.36 et VI.37: Carte d'isoteneur en fer (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	95
Figure VI.38 et VI.39: Carte d'isoteneur en cuivre (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	96
Figure VI.40 et VI.41 : Carte d'isoteneur en zinc (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009).....	97
Figure VI.42 et VI.43 : Carte d'isoteneur en phosphate (mg/l), (Compagnes de Mai et Sept 2009)	
Figure VI.44 : Cercle de corrélation selon le plan 1-2	103
Figure VI.45 : Représentation des individus selon le plan 1-2	103
Figure VI.46 : Cercle de corrélation selon le plan 1-2	105
Figure VI.47 : Représentation des individus selon le plan 1-2	105

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II :

Tableau II.1 : Colonne lithostratigraphique et hydrogéologique	14-15
--	-------

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : Echelle de résistivité	21
--	----

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : Coordonnées Lambert et internationales des stations météorologiques.....	28
Tableau IV.2: précipitations moyennes sur 25 ans d'observations à la station d'Ain Yaghout. Série ancienne de P. Seltzer (1913 – 1938).....	30
Tableau IV.3: Précipitations moyennes aux stations d'Ain Yaghout et Ain Skhouna.....	30
Tableau IV.4 : Application de la méthode arithmétique	33
Tableau IV.5 : Valeur moyenne de la lame d'eau moyenne précipitée.....	34
Tableau IV.6 : Températures moyennes mensuelles et annuelles pour la station d'Ain Skhouna durant la période (1984-2000).....	36
Tableau IV.7 : Valeurs du rapport P/T à la station d'Ain Skhouna (1984-2000).....	37
Tableau IV.8 : Humidité relative en (%) à la station d'Ain Skhouna. Période (1984-2000).....	39
Tableau IV.9 : vitesses moyennes mensuelles du vent à la station d'Ain Skhouna. Période (1984-2000).....	40
Tableau IV.10 : Valeurs moyennes mensuelles de l'insolation à la station d'Ain Skhouna. Période (1984-2000).....	40
Tableau IV.11 : Calcule de l'ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Ain Skhouna. Période (1984-2000).....	42
Tableau IV.12 : Bilan hydrique d'après Thornthwaite à la station d'Ain Skhouna.....	45
Tableau IV.13 : Valeurs de l'ETP et l'ETR obtenues par différentes méthodes.....	46

CHAPITRE V :

Tableau V.1 : Bilan hydrogéologique.....	53
--	----

CHAPITRE VI :

Tableau VI.1 : L'agressivité ou l'incrustante de l'eau.....	59
Tableau VI.2 : Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité.....	61
Tableau VI.3 : Classification des eaux souterraines des deux compagnes selon STABLER.....	63
Tableau VI.4 : Classification des eaux souterraines des deux compagnes selon PIPER	65
Tableau VI.5 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de SCHOELLER- BERKALOFF....	65
Tableau VI.6 : Normes de potabilité de l'O.M.S.	81
Tableau VI.7 : Dureté des eaux en °F selon W. THEOBALD et A. GAMA, 1969.....	81
Tableau VI.8 : Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Salinité).....	82
Tableau VI.9: Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.....	85
Tableau VI.10 : Directives concernant la qualité de l'eau d'irrigation.....	86
Tableau VI.11: Résultats d'utilisation du diagramme de Wilcox.....	86
Tableau VI.12 : Eléments toxiques ou indésirables dans l'eau potable	89
Tableau VI.13: Paramètres statistiques des éléments chimiques.....	101
Tableau VI.14 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	101
Tableau VI.15 : Pourcentage de variance exprimée.....	101
Tableau VI.16: Paramètres statistiques des éléments polluants.....	102
Tableau VI.17 : Matrice de corrélation des éléments polluants.. ..	104
Tableau VI.18 : Pourcentage de variance exprimée.....	104

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau représente à l'échelle de la planète un élément vital pour la subsistance de tout être vivant. C'est aussi un facteur prépondérant pour toute activité socio-économique, depuis l'aube de l'humanité. Les dernières décennies ont été caractérisées par une industrialisation galopante et par une sécheresse intense qui touche l'Algérie d'une manière générale. Cette situation rend le domaine de l'eau de plus en plus vital et les nappes aquifères de plus en plus vulnérables à la pollution.

La région d'étude (la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout) se situe au Nord Est de la ville de Batna. Cette plaine s'étale sur une superficie de 416 km². Cette étude a pour objet la connaissance des caractères géologiques, hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques de cette plaine avec une mise en relief des différentes sources de pollution et leur impact sur les eaux souterraines de l'aquifère superficiel de la région.

Pour mieux aborder ce problème, nous avons adopté la méthodologie suivante :

1. Un aperçu géographique de la région de Gadaïne – Ain Yaghout ;
2. Une étude du cadre géologique consistera à définir la lithologie des formations constituant la région, les différentes phases tectoniques et paléogéographiques ;
3. Une interprétation des données géophysiques qui a pour objectif la détermination de la géométrie de l'aquifère et la nature des différentes formations ;
4. Une étude hydroclimatologique permettra d'évaluer les apports d'eau alimentant les réserves d'eau souterraine ;
5. Une étude hydrogéologique afin d'analyser l'état piézométrique et évaluer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ;
6. Une étude hydrochimique qui a pour but de définir les faciès chimiques des eaux souterraines, de les comparer et de suivre l'évolution dans l'espace et dans le temps de ces faciès. Il sera également apprécié la qualité des eaux souterraines du point de vue potabilité et aptitude à l'irrigation. Enfin, de déterminer le degré de pollution des eaux souterraines par les éléments nutritifs et par les métaux lourds (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} et PO_4^{3-}).

CHAPITRE I

CADRE GEOGRAPHIQUE

I.1.Situation géographique :

La région d'étude fait partie de la frange Nord-Ouest des hautes plaines Sud -constantinoises. Elle est comprise entre le Néritique constantinois au Nord et la zone atlasique au Sud, (Fig.I.1).

La région se trouve dans la commune d'Ain Yaghout au Nord Est de la wilaya de Batna.

La plaine a une altitude moyenne de 820 m, elle est occupée dans son axe diagonal NE-SW par les chotts de Tinsilt, Taricht Teniet Saida et Gadaïne, (Fig.I.2).

Cette plaine est limitée :

- Au Nord par chott Tinsilt, Dj Guedmane, Dj Tizourit et Dj Merzeguène.
- Au Sud par Dj Tafraout, Koudiat Tfouda, Dj Sarif et Merfegue Et Tissane.
- A l'Est par les monts d'Ain Yaghout.
- A l'Ouest par chott Gadaïne.

Les coordonnées Lambert qui limitent cette zone sont les suivantes :

$X_1 : 819 \text{ (km)} - X_2 : 844 \text{ (km)}$.

$Y_1 : 270 \text{ (km)} - Y_2 : 296 \text{ (km)}$.

La superficie du sous bassin de Sebkheth Ez Zemoul auquel appartient notre zone d'étude est de 1467 km² environ alors que la superficie de cette dernière est de l'ordre de 416 km².

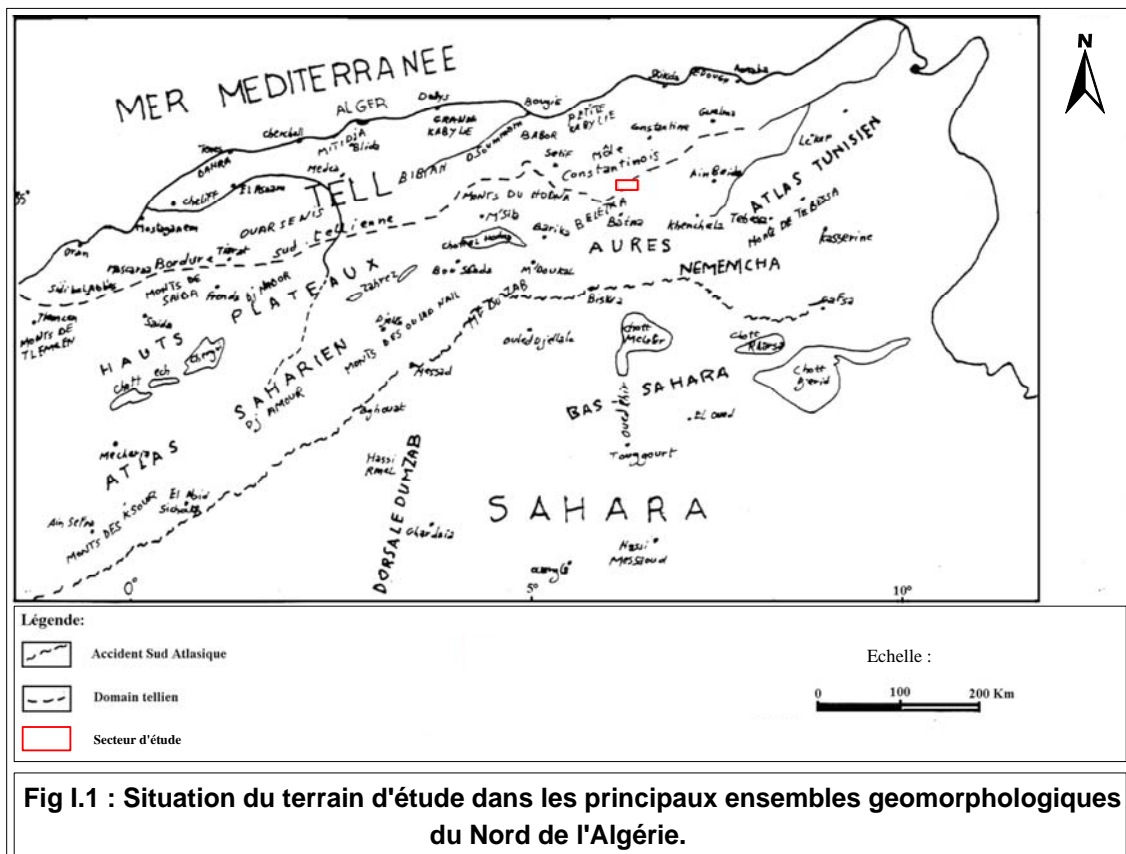


Fig I.1 : Situation du terrain d'étude dans les principaux ensembles geomorphologiques du Nord de l'Algérie.

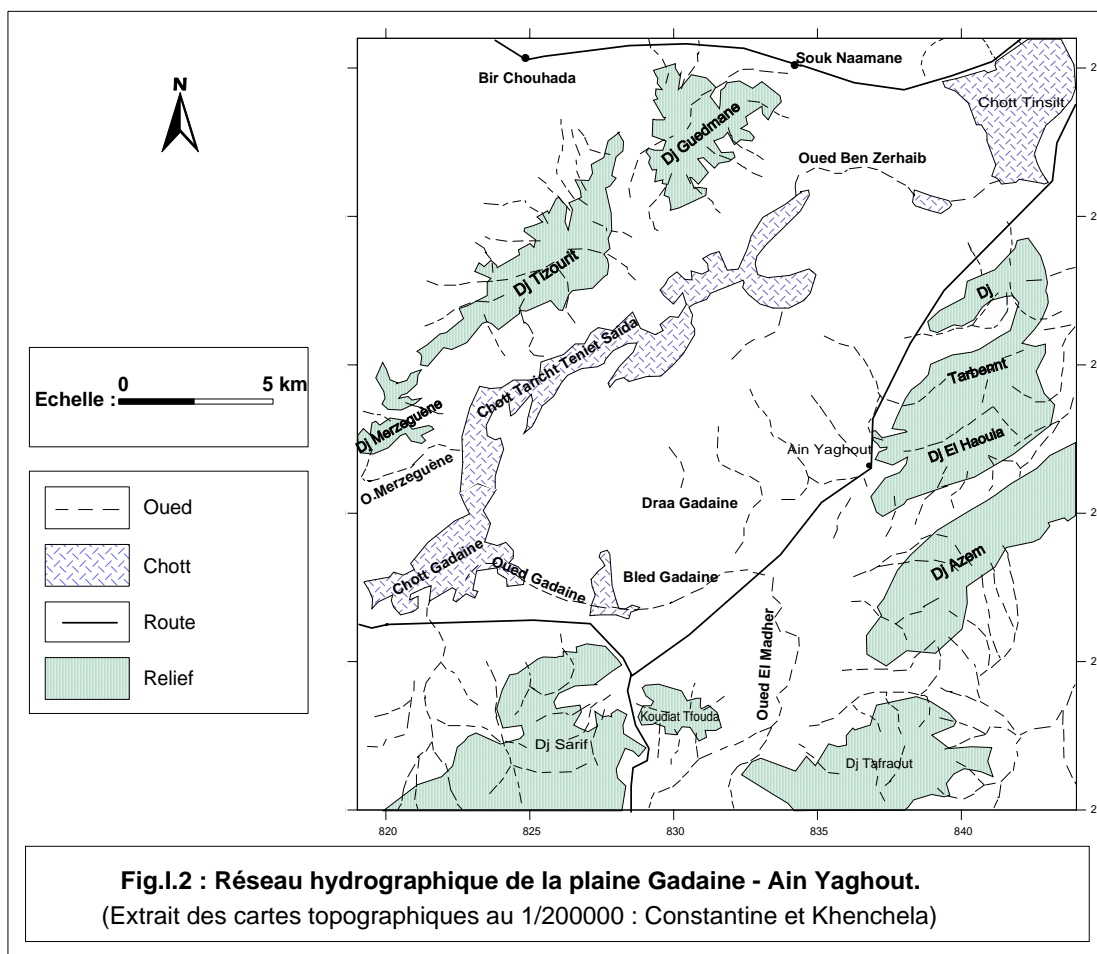
I.2. Géomorphologie :

La région d'étude se situe au Nord Est algérien, sa géomorphologie est liée à la tectonique cassante des phases atlasiques où on distingue une zone d'effondrement dont la partie la plus basse est occupée par : chott Tinsilt (788m), Gueraât Ben Heni (796m), Taricht Teniet Saïda (799m) et chott Gadaïne (805m), correspondant à la plaine. Cette dernière est entourée par une zone surélevée correspondant à des massifs tels que : Dj Tarbennt (958m), Dj Taфраout (1046m), Dj Guedmane (1132m) et Dj Merzeguène (1048m)...., qui ont une grande importance hydrogéologique.

I.3. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est lié à l'organisation des reliefs (Fig.I.2). La zone étudiée est marquée par la présence d'un ensemble de chotts (chott Tinsilt, chott Gadaïne...), traduisant l'existence d'un système hydrogéologique endoréique.

Les cours d'eau temporaires prennent naissance au niveau des hauts reliefs, tels que : Oued Ben Zerhaïb, Oued Merzeguène et Oued Gadaïne pour se déverser dans les lacs salés.



I.4- Climat :

Le climat régnant est de type semi-aride, il est marqué par deux saisons bien distinctes :

- Une saison froide et humide s'étalant de Novembre jusqu'à Mars avec souvent des chutes de neige et de brusques gelées.
- Une saison chaude et sèche qui se prolonge d'Avril jusqu'à Octobre.

Cette distinction caractérise les hautes plaines constantinoises, Au niveau de cette zone, les précipitations annuelles ne dépassent pas les 400 mm, ce qui explique l'aridité du climat.

La température moyenne annuelle est de 14.24 °C. Le sirocco qui souffle souvent au printemps et au début de l'été représente un danger pour les cultures céréalières par augmentation de l'évapotranspiration.

I.5-Couvert végétal :

La végétation est clairsemée pour ne pas dire presque absente. En effet la majeure partie des terres de la plaine étudiée est exploitée par les habitants qui y pratiquent la céréaliculture. Autour des habitations et de quelques fermes, nous observons des petits jardins irrigués à partir des puits de faible profondeur, où sont cultivés des légumes et du tabac. Par ailleurs, à proximité des chotts se développent parfois des plantes halophiles et des steppes à armoise (Halfa et Diss) qui servent assez souvent de lieux de pâturage aux troupeaux.

I.6.Aperçu socio-économique :**I.6.1.Population :**

La population dans le bassin des hauts plateaux constantinois s'élève à un million deux cent dix huit mille deux cent quarante sept (1218247) habitants selon le recensement de (1998). Elle est répartie à travers soixante seize (76) communes et cinq (5) wilayas, trente cinq (35) communes sont entièrement incluses dans le bassin et quarante et une (41) partiellement.

La population d'Ain Yaghout est de cinq mille huit cent vingt (5820) personnes. Les mechtas sont réparties près des oueds et les eaux des puits qui sont destinées pour soit les besoins quotidiens à usage domestique ou soit à usage agricole.

I.6.2.Agriculture :

La vocation de la région est typiquement agricole, avec un développement des cultures céréalières, des légumes, le tabac et les cultures maraîchages. L'élevage des bovins et des ovins est également présent.

Conclusion :

Au terme de ce chapitre, on peut dire que :

- La région d'étude correspond à une cuvette d'effondrement entourée par des massifs dont l'axe de direction NE -SW est occupé par des chotts ;
- Les cours d'eau temporaires prennent naissance au niveau des hauts reliefs pour se jeter dans les lacs salés formant ainsi un système endoréique ;
- Le climat régnant sur la plaine est de type semi aride ;
- La végétation occupant la plaine est de type steppes à armoise et halophile avec une culture intense des céréales et d'élevage des ovins.

CHAPITRE II

CADRE GEOLOGIQUE

Introduction :

La géologie constitue la base fondamentale de toute étude hydrogéologique, elle détermine les formations susceptibles ou non de constituer des aquifères à partir de leur lithologie; ainsi que la détermination des relations pouvant exister entre eux.

La synthèse géologique de la région a été réalisée sur la base des documents suivants :

- Les cartes géologiques d'Ain Yaghout et Ain El Ksar, et ses notices explicatives au 1/50 000 ;
- Les logs de sondages effectués dans la région ;
- Les travaux réalisés par Mr J.M.Vila sur la région.

II.1. Géologie régionale :

Parmi des nombreux chercheurs qui ont étudiés la structure géologique Nord Africaine nous citons W.Wildi (1983) qui subdivise le Nord algérien en trois domaines paléogéographiques qui sont du Nord au Sud, (Fig.II.1) :

II.1.1. Domaine interne :

Il comprend le socle Kabyle cristallin et sa couverture sédimentaire paléozoïque peu ou pas métamorphisée, caractérisant surtout la grande et la petite kabylie.

II.1.1.1. Le Socle Kabyle :

Il est composé de deux grands ensembles :

- Un ensemble de roches peu ou pas métamorphiques ;
- Un ensemble de roches métamorphiques mésozonales à catazonales.

II.1.1.2. La chaîne calcaire Kabyle :

Elle constitue la couverture de la bordure méridionale du Socle Kabyle. Cette dorsale comporte des formations allant du Permo-Trias au Lutétien.

II.1.2. Domaine médium (sillon des flyschs):

C'est un domaine paléogéographique qui a reçu une sédimentation essentiellement argilo-gréseuse depuis le Crétacé jusqu'au Paléocène. En Algérie, ce domaine occupe une position allochtone. Il est classiquement subdivisé en deux types :

II.1.2.1. Les flysch maurétanien et massylien :

Constitués par des formations grès-pélimitiques qui se sont déposées du Barrémien à l'Albien, au Nord le flysch maurétanien et au Sud le flysch massylien

II.1.2.1. Le flysch numidien :

Il occupe une position structurale allochtone la plus haute de l'édifice alpin. Il comporte une formation pélimitique de base d'âge Oligocène, des alternances de grosses barres de grès et de pélimites de l'Oligocène et de l'Aquitainien et des argiles et silexites sommitales du Burdigalien inférieur.

II.1.3. Domaine externe :

Le domaine externe est situé plus au Sud, il comporte les séries telliennes et les séries de l'avant pays. Les séries telliennes reposent partiellement sur l'autochtone Saharien.

II.1.3.1. Les séries telliennes :

Ce sont des séries épaisses à faciès marno-calcaire d'âge Eocène, issues du sillon tellien. Elles sont constituées par un empilement de trois grandes séries qui sont, du Nord vers le Sud :

II.1.3.1.1. Une série ultra-tellienne :

Caractérisée par des formations calcaires et marno-calcaires d'âge Crétacé à Eocène. Elle affleure dans la région d'Oued Zenati entre Constantine et Guelma.

II.1.3.1.2. Une série tellienne sensu-structo:

Caractérisée essentiellement par des dépôts terrigènes du Crétacé inférieur, elle affleure essentiellement dans la région de Sétif (nappe de Djemila).

II.1.3.1.3. La nappe péni-tellienne :

A faciès néritique prépondérant du Crétacé supérieur à l'Eocène. La nappe apparaît en lambeaux, charriés sur les massifs néritiques de Djebel Grouz, Djebel Kheneg et Chettaba, et en fenêtres sous les marnes noires des nappes telliennes de Djebel Akhal.

II.1.3.2. Les séries de l'avant pays allochtone :

L'avant pays correspond aux formations calcaires et marneuses de la plate-forme constantinoise et du domaine atlasique. Il comporte l'avant pays allochtone et l'avant pays autochtone :

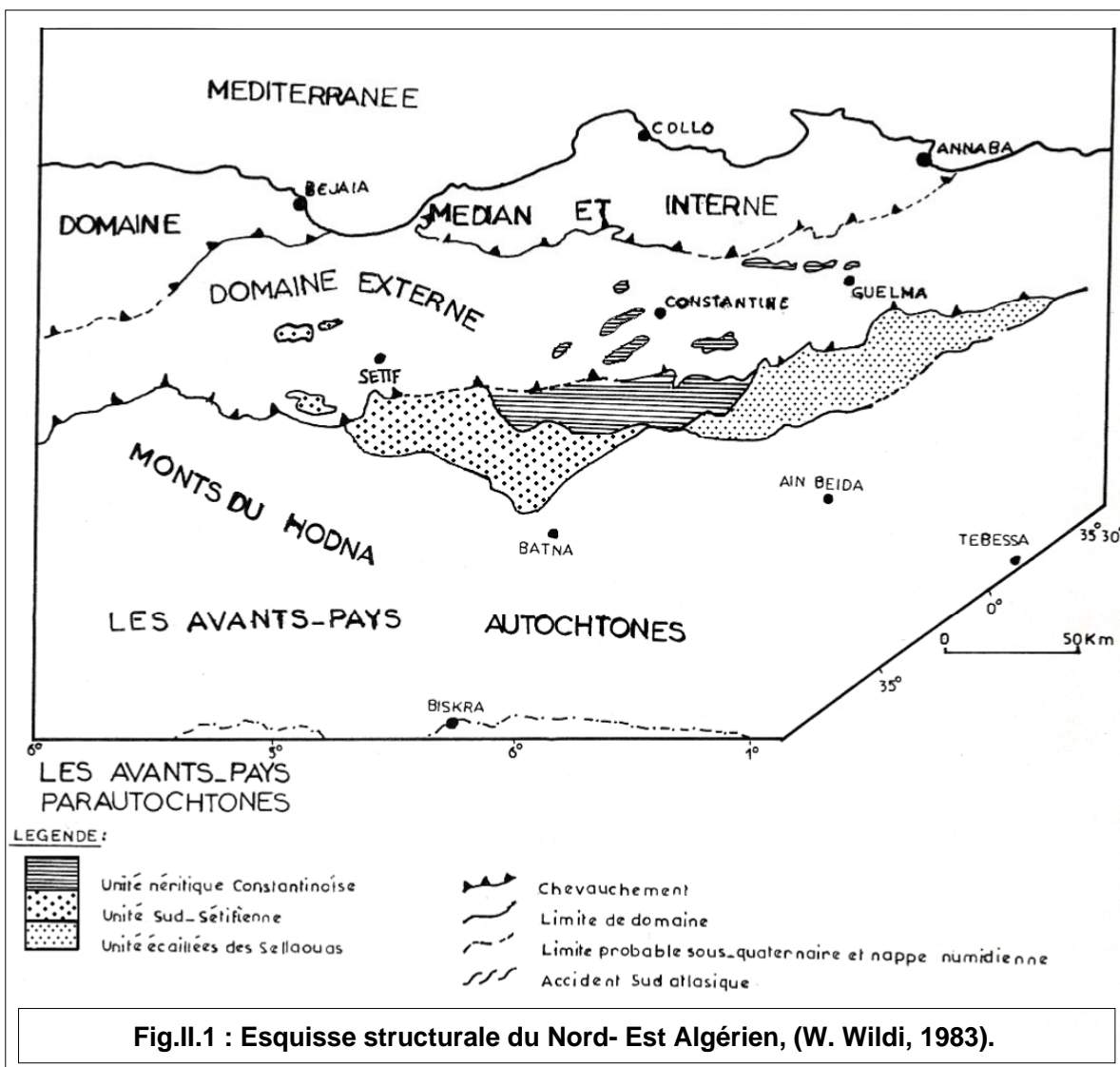
II.1.3.2.1. L'avant pays allochtone :

Il regroupe trois grandes unités qui sont :

- L'ensemble Sud Sétifien.
- L'unité Néritique Constantinoise.
- L'unité de type Sellaoua.

II.1.3.2.2. L'avant pays autochtone :

Il est représenté par des séries sédimentaires mésozoïques épaisses et très plissées. Ces séries sont principalement localisées au niveau de l'Atlas Tunisien, de l'Atlas Saharien, des monts du Hodna, des monts de Batna et des Aurès.



II.2. Géologie locale :

Dans notre zone d'étude, nous avons deux unités qui sont, (Fig.II.2) :

- Au Nord, il s'agit de l'ensemble allochtone sud sétifien composé par les écaillés de Dj Guedmane, Tizourit et Merzguène d'âge Crétacé.
- Au Sud et à l'Est, les reliefs appartiennent aux formations parautochtones et autochtones nord aurésiennes constituées par les écaillés des monts d'Ain Yaghout, Dj Tafraout, Koudiat Tfouda et Dj Sarif d'âge Jurassique - Crétacé.

Une couverture mio-plio –quaternaire occupe toute la plaine.

II.2.1. Analyse litho stratigraphique :

Les formations géologiques selon leur nature lithologique définissent les différentes unités hydrogéologiques.

Du point de vue lithologique, la zone étudiée comprend de haut en bas les formations suivantes (Tab.II.1) :

II.2.1.1. Formations peu ou pas tectonisées :

➤ Les formations du Quaternaire :

Eboulis (e) :

Les éboulis à blocs sont peu développés dans la région où les reliefs sont assez faibles en raison de la morphologie. Les éboulis en masse sont localisés sur le versant Nord du Dj Sarif et qui sont apparus comme des vastes zones d'épandage de blocs.

Sols de sebkha (s) :

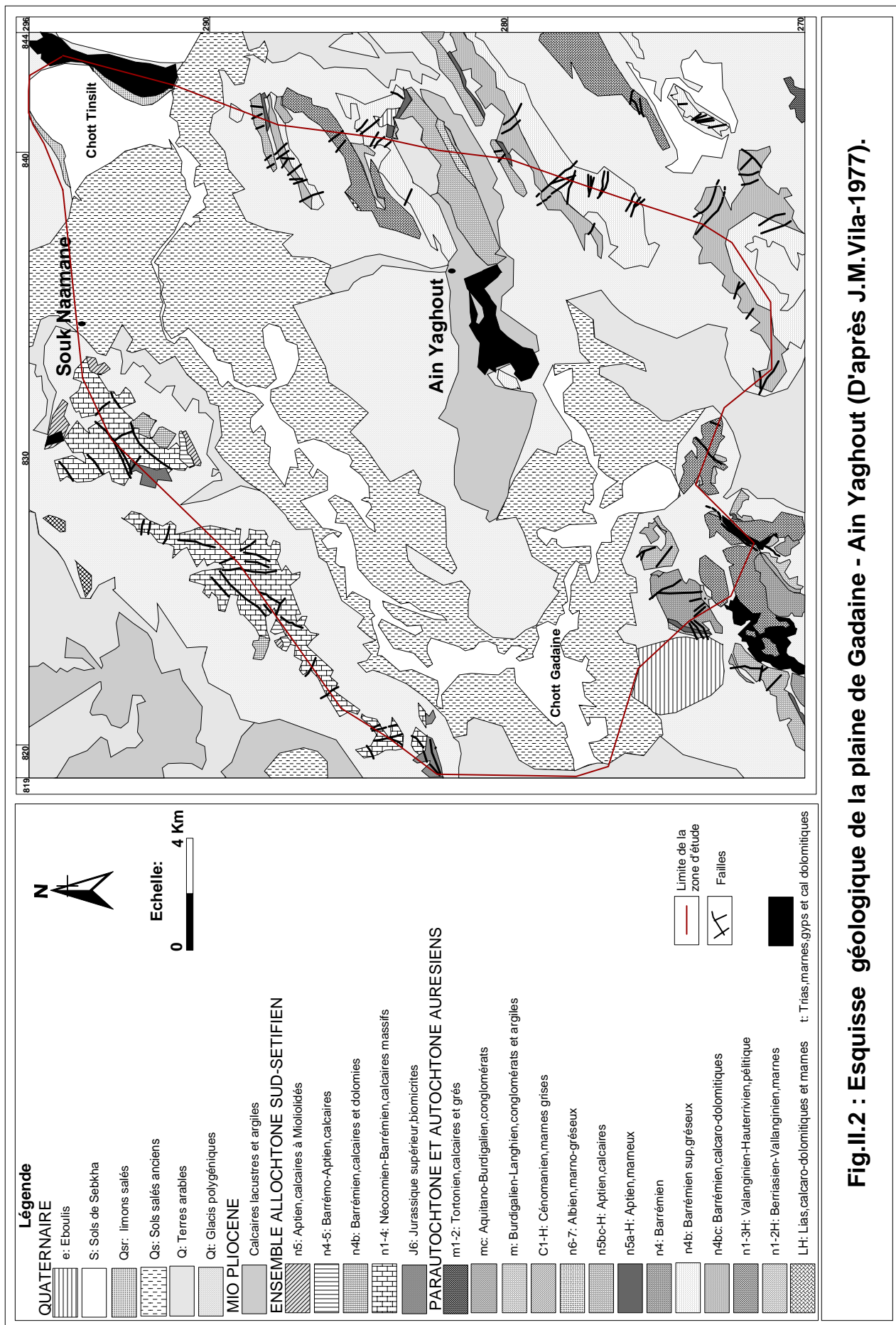
Ce sont des vases qui occupent des terrains presque inondés au chott Tinsilt et souvent asséchés au chott Taricht Teniet Saïda où ils sont dépourvus de toutes végétations sauf quelques plantes rabougries de salsolacées.

Limons salés périodiquement inondés (Q^{sf}) :

Ces limons bordent le chott Tinsilt .Ils ont permis l'installation des salants des lacs.

Sols salés anciens (Q^s) :

Ils forment de vastes étendues plates à végétation caractéristique de ces sols (les salsolacées) et correspondent à d'anciens sols hydromorphes salés. Ils sont surélevés de 0.5 m à 1m au dessus du niveau du chott Gadaïne.



Terres arables, formations de pente, alluvions anciennes et quaternaire indéterminé (Q) :

C'est un ensemble représenté par des limons et graviers sur lesquels se sont installés des sols bruns le plus souvent peu calcaires.

Glacis polygéniques nappant les reliefs (Q') :

C'est la forme de relief la plus caractéristique des hautes plaines constantinoises. Ces glacis correspondent à des surfaces très faiblement pentées près des plaines et dont la pente augmente progressivement vers les reliefs. Ils sont recouverts d'un matériel clastique faiblement calibré et très fragmenté vers le bas devenant plus anguleux et plus grossier au voisinage des reliefs.

➤ Les formations du Mio-Pliocène continental :

Ces formations affleurent à Draa Gadaine et entre les monts d' Ain Yaghout. Il s'agit de conglomérats souvent mal cimentés, d'argiles jaunâtres sableuses et de calcaire lacustre mal stratifié rosâtre ou blanc.

II.2.1.2. Ensemble allochtone Sud Sétifien :

Les formations de cette unité forment les affleurements du Dj Merzeguène, Dj Tizourit et Dj Guedmane.

Aptien (n⁵) :

C'est une série de 150 m, constituée essentiellement de calcaires en petits bancs et de micrites renfermant une microfaune représentée par des Orbitolines et des Miliolidés.

Barrémo-Aptien (n⁴⁻⁵) :

C'est une corniche massive de calcaires compacts riches en microfaunes tel que : les lamellibranches et les échinodermes.

Barrémien (n^{4b}) :

C'est un ensemble formé par une épaisse série d'une centaine de mètres. Il est constitué de : calcaires, de dolomies et de grès, qui sont séparés par des intercalations de marnes sableuses ou argileuses.

Néocomien-Barremien (n¹⁻⁴) :

Il est représenté par des calcaires massifs oolithiques ou graveleux et par des dolomies.

Jurassique supérieur (J⁶) :

Ce sont des biomicrites à Dasycladacés formant la série jurassique dont le sommet apparaît à Dj Guedmane sur 80 m environ près de Teniet Saïda. La série se complète vers la base par une cinquantaine de mètres de calcaires massifs au Dj Merzeguène.

II.2.1.3. Ensemble parautochtone et autochtone aurésien :

Les affleurements de cet ensemble forment les monts d'Ain Yaghout, Dj Tafraout, K^{at} Tfouda et Dj Sarif.

Tortonien (m^{1-2}) :

Ce sont des calcaires à la base et des grès au sommet. Il affleure au Sud Est du Dj Tafraout.

Aquitano-Burdigalien (m^c) :

Ce sont des conglomérats qui affleurent au Merfegue et Tissane.

Burdigalien – Langhien (m) :

Il est représenté par des conglomérats, des argiles et des marnes bleues à Ostréidés.

Cénomaniens (C_H^1) :

C'est une alternance de marnes grises et de calcaires massifs beiges. Il affleure au Dj Tarbennt et au Dj Haouïa.

Albien (n_H^{6-7}) :

Ce sont des grès et des marnes gréseuses à la base et des marnes au sommet. Ils ne sont visibles qu'à la base de la série renversée de Dj Tarbennt et le flanc Nord du pli déversé d'Ain Yaghout au Dj Haouïa.

Aptien supérieur (n_H^{5bc}) :

Il est organisé en une dizaine de grosses barres de calcaires bien lités en bancs métriques riches en Miliolidés avec des intercalations d'oosparites bioclastiques brunes et des bancs dolomitiques ocres à jaunes. L'Aptien calcaire forme une barre de 350 m d'épaisseur. Il constitue l'arrête nord des Dj Tarbennt, Haouïa et Dj Azem.

Aptien inf (n_H^{5a}) :

Il s'agit d'une série à dominance marneuse de 70 à 80 m d'épaisseur. Il affleure au Merfegue Ettissane, Azem et au Dj Haouïa.

Barrémien (n^4) :

Il est constitué de grès massifs dont le milieu contient des micrites et des passées de dolomies.

Barrémien (n_H^{4d}) :

C'est un grès à intercalations dolomitiques ou biosparitiques de 200 à 250 m d'épaisseur.

Il affleure au Dj Haouïa, Dj Azem et Dj Tafraout.

Barrémien (n^{4bc}) :

Il est constitué de calcaires dolomitiques à intercalations argileuses ou argilo-silteuses, et de petits niveaux de grès. Ces formations affleurent au Dj Azem et Dj Tafraout.

Valanginien-Hauterrivien (n_H^{1-3}) :

C'est un ensemble argilo-pélitique avec de petits niveaux gréseux, très épais (800 m) et induit par la tectonique tangentielle. Il affleure au Dj Tarbennt et K^{at} Tfouda.

Berriasien et Valanginien (n_H^{1-2}) :

Cette formation mise en évidence au pied du Rass Tarbennt, est constituée de marnes verdâtres à intercalations gréso-quartziques rousses à la base et de calcaires micritiques au sommet.

Jurassique ($J_H^{s-n 1}$) :

Il est constitué de calcaires à alternances marno-micrites. Il a une épaisseur de 110 m. Il affleure au Dj Tombait, K^{at} Tfouda et Dj Sarif.

Jurassique (J_H^S) :

Il est représenté par des marno-calcaires indifférenciés. Il ne dépasse pas 50 m d'épaisseur visible. Il affleure au Dj Tarbennt Srhir.

Jurassique (J_H^{S-mH}) :

Il est constitué de marno-calcaires roses et jaunes écrasés. Il n'a été distingué qu'au Dj Tarbennt.

Jurassique moyen (J_H^{mF}) :

C'est une barre de calcaire argileux fin à silex. Il affleure au Dj Tombait et Dj Sarif.

Lias sup. - Jurassique inf ($Is - J_H^S$) :

Il s'agit de marnes écrasées indifférenciées affleurant au Dj Tarbennt.

Lias sup. (Is_H) :

C'est une série de dolomies, de marno-calcaires et de marnes.

Lias (L_H) :

Il est représenté par une épaisse série de calcaires, de dolomies et de marnes, pouvant atteindre 400m d'épaisseur. Il constitue le cœur de l'anticlinal du Dj Tombait et les hauteurs du Rass Tarbennt, Dj Tarbennt Srhir et Dj Sarif.

II.2.1.4. Trias exotique ou extrusif (t) :

Il affleure à l'Est du chott Tinsilt, près de Draa Gadaïne, K^{at} Tfouda et Dj Sarif. Il est constitué de marne bariolée, de gypse bréchtique et de calcaire dolomitique.

Unité	Ere	Système	Sous système	Étage et sous étage	Symbole	Coupe	Lithologie	Épaisseur (m)	Perméabilité relative	Nature de l'aquifère	
Formations peu ou pas tectonisées	Quaternaire				e		Eboulis à blocs et en masses		Perméable	Aquifère poreux du Mio-Plio-Quaternaire	
					s		Vases.		Perméable		
					Q st		Limons salés.		Perméable		
					Q ^s		Sols salés anciens hydromorphes.		Perméable		
					Q		Alluvions, limons et graviers.		Perméable		
					Q ^t		Glacis polygéniques.		Perméable		
	Néogène		Mio-Pliocène		mp		Calcaire lacustre mal stratifié. Argile sableuse. Conglomérats	90	Semi-perméable		
Ensemble Allochtone Sud Sétifien	Secondaire	Crétacé	Inférieur	Aptien	n ⁵		Micrites Calcaires massifs.	150	Perméable	Aquifère karstique	
				Barrémo-Aptien	n ⁴⁻⁵		Calcaires compacts.	120	Imperméable	Substratum	
				Barrémien	n ^{4b}		Grès à intercalations marneuses. Dolomies. Calcaires.		Perméable	Aquifère	
				Néocomien-Barrémien	n ¹⁻⁴		Dolomies. Calcaires.	150 à 200	Perméable	karstique	
			Jurassique	Supérieur		J ⁶		Calcaires.	80	Perméable	
Ensemble Autochtone et Parautochtone Aurésiens.	Tertiaire	Néogène	Miocène	Sup	Tortonien	m ¹⁻²		Grès. Calcaires.		Perméable	
				Inf	Aquitano-Burdigalien	m ^c		Conglomérats.		Perméable	Aquifère poreux
					Burdigalien-Langhien.	m		Conglomérats marnes		Semi-perméable	
	Secondaire	Crétacé	Supérieur	Cénomaniens sup.	C ^{1H}		Alternances de marnes grises et calcaires	150	Semi-perméable	Aquifère karstique	
				Albien	n ^{6-7H}		Marnes. Marno-gréseux Grès.	60	Imperméable	Substratum	
					n ^{5bcH}		Calcaires dont la partie médiane contient des bancs dolomitiques.	350	Semi-perméable	Aquifère poreux	
				Aptien sup	n ^{5bcH}		Calcaires dont la partie médiane contient des bancs dolomitiques.	350	Perméable	Aquifère Karstique	
				Aptien inf	n ^{5aH}		Marnes.	70 à 80	Imperméable	Substratum	
				Barrémien	n ⁴		Grès dont le milieu contient des passées de micrites et de dolomies.		Perméable	Aquifère	
					n ^{4dH}		Grès à intercalations dolomitiques.	200 à 250	Perméable	poreux	
					n ^{4bc}		Calcareo-dolomitiques avec des niveaux de grès.		Perméable	Aquifère karstique	
				Néocomien	Valanginien-Hauterri vien	n ^{1-3H}		Argilo-pélitiques.	800	Imperméable	Substratum
					Berriasien et valanginien	n ^{1-2H}		Marnes avec intercalations grésos-quartziques à la base et calcaires micritiques au sommet.		Semi-perméable	Aquifère Karstique

Tableau II.1 : Colonne lithostratigraphique et hydrogéologique (Ensemble allochtone Sud sétifien et autochtone et parautochtone aurésien).

Unité	Ere	Système	Sous système	Etage et sous étage	Symbole	Coupe	Lithologie	Epaisseur (m)	Perméabilité relative	Nature de l'aquifère		
Ensemble Autochtone et Parautochtone Aurésiens	Secondaire	Jurassique	Supérieur	Tithonique-Berriasien	$J^{s-n} \underset{H}{1}$		Calcaires avec des alternances marno-micrites.	110	Semi-perméable	Aquifère Karstique		
					$J^S \underset{H}$		Marno-calcaires.	50	Semi-perméable			
					$J^{S-m} \underset{H}$		Marno-calcaires.		Semi-perméable			
			Moyen		J^{mF}		Calcaires argileux à silex.		Semi-perméable			
			Inférieur	Lias sup-Jurassique inf	$Is- J^S \underset{H}$		Marnes.		Imperméable	Substratum Aquifère Karstique		
				Lias sup	$Is \underset{H}$		Marnes. Marno-calcaires. Dolomies.		Semi-perméable			
				Lias	$L \underset{H}$		Calcaro-dolomitiques.	400	Perméable			
			Trias				t		Calcaro-dolomitiques. Gypses bréchiques. Marnes bariolées.		Imperméable	Substratum

Tableau II.1 : Colonne lithostratigraphique et hydrogéologique (Ensemble autochtone et parautochtone aurésien), (Suite)

II.3. Analyse tectonique et structurale :

La structure des réservoirs est conditionnée par la tectonique, cette dernière joue un rôle important dans le développement de la karstification d'une part, la forme du réservoir et le sens d'écoulement des eaux d'autre part.

II.3.1. Principales phases tectoniques :

L'histoire tectonique de la région est caractérisée par deux grandes phases orogéniques qui sont responsables des structures rencontrées dans la région d'étude, (Fig. II.3).

a) La phase atlasique :

C'est une phase priabonienne qui commençait dès la fin du Crétacé supérieur jusqu'au Lutétien supérieur - Priabonien. Cette phase est caractérisée par un plissement des formations qui provoquait l'apparition des anticlinaux et des synclinaux orientés généralement SW-NE, elle donne les premières nappes de charriages dans la partie septentrionale.

b) La phase alpine :

Il s'agit essentiellement de la phase miocène (Tortonienne) qui déformait la chaîne plissée priabonienne en créant de nouvelles nappes de charriages dans l'avant pays et conduisait à l'apparition des plis emboîtés.

L'accumulation des sédiments plio-quaternaires, rarement déformés correspond à un comblement des reliefs dans le domaine des hautes plaines constantinoises et au pied des Aurès. Après le Tortonien supérieur deux phases successives de distension et de compression affectaient l'édifice des nappes tortoniennes en le plissant et en le faillant intensément, créant ainsi les reliefs actuels.

Ces phases tectoniques donnent deux grands ensembles structuraux bien distincts qui sont de haut en bas et du Nord au Sud :

- L'ensemble allochtone sud sétifien.
- Les formations parautochtones et autochtones aurésiennes.

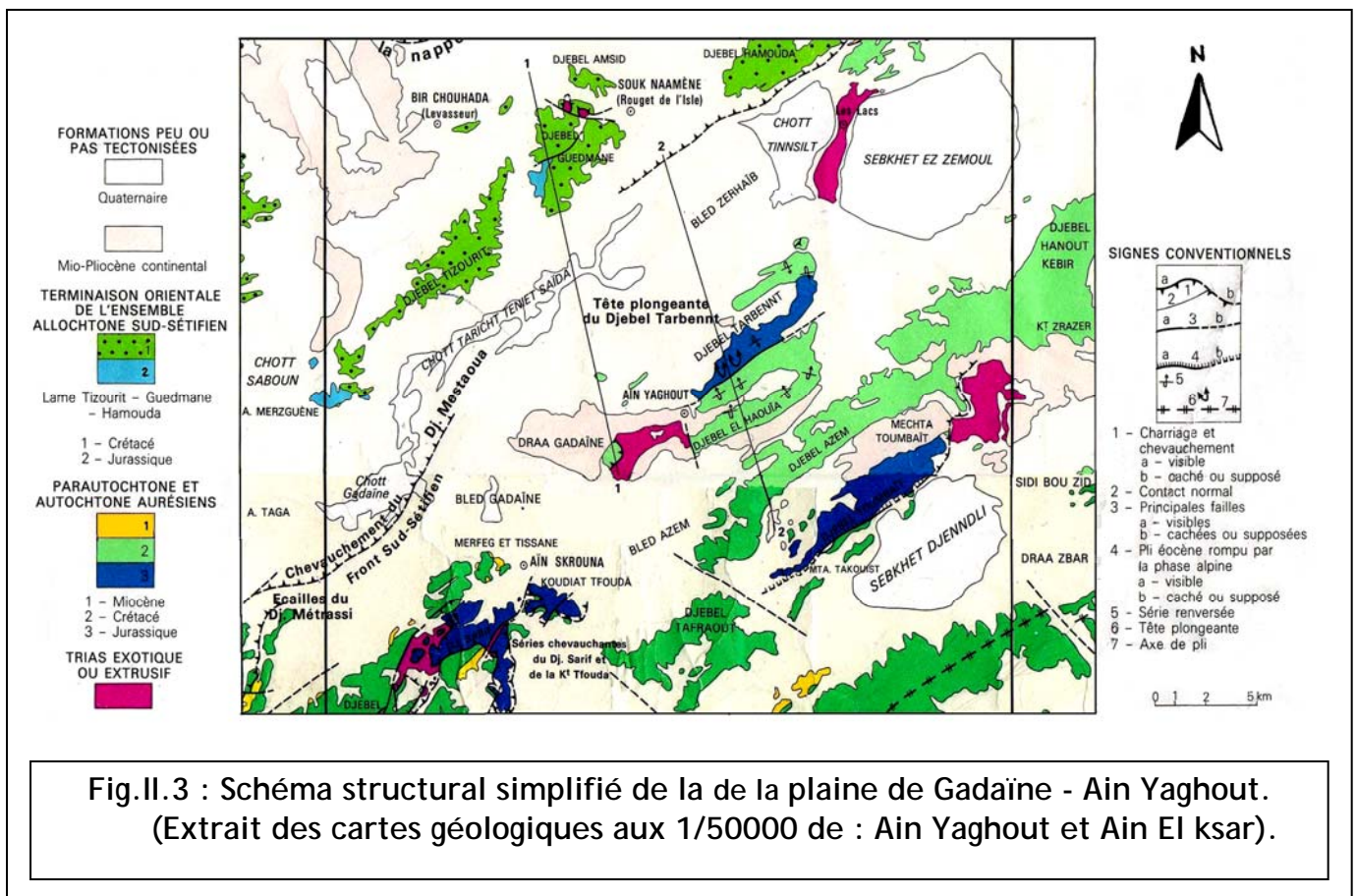


Fig.II.3 : Schéma structural simplifié de la de la plaine de Gadaïne - Ain Yaghout. (Extrait des cartes géologiques aux 1/50000 de : Ain Yaghout et Ain El ksar).

II.3.2. Coupes géologiques :

Les coupes géologiques de la figure II.4; montrent que :

- L'anticlinal du Dj Guedmane qui appartient à l'ensemble sud sétifien est très faillé et il est séparé de l'ensemble autochtone et parautochtone aurésien qui est très tectonisé comme le montre le pli déversé d'Ain Yaghout, par le Trias.
- La faille située entre Dj Guedmane et Dj Amsid provoque l'apparition du Trias entre ces deux reliefs.
- Le contact de l'anticlinal couché du Dj Tarbennt et le synclinal déversé du Dj Haouïa se fait par une faille verticale.
- Le Mio-Pliocène est discordant au Dj Azem et Dj Tombaït, et discordant et plissé au Dj Haouïa.

II.4. Karstification :

L'importance des formations carbonatées présentes dans le secteur d'étude et l'intensité de la fracturation avec la présence de l'eau, laissent entrevoir la possibilité d'un développement karstique assez important.

II.5. Paléogéographie :

Du point de vue paléogéographique, on peut établir l'opposition qui existe entre l'ensemble allochtone sud sétifien et le domaine aurésien.

- Le premier possède un Jurassique et un Crétacé basal carbonatés très littoraux.
- Le second montre un Jurassique moyen et supérieur nettement pélagique suivi par un Crétacé basal où s'installe une sédimentation épaisse et surtout détritique.

Au Crétacé inférieur et supérieur les oppositions sont moins nettes entre ces deux domaines où s'installe une sédimentation à dominance calcaro-dolomitique ou gréseuse. Notons que les éléments gréseux n'atteignent pas vers le Nord la plate-forme néritique constantinoise. Cela est particulièrement net au Néocomien, au Barrémien supérieur et à l'Albien.

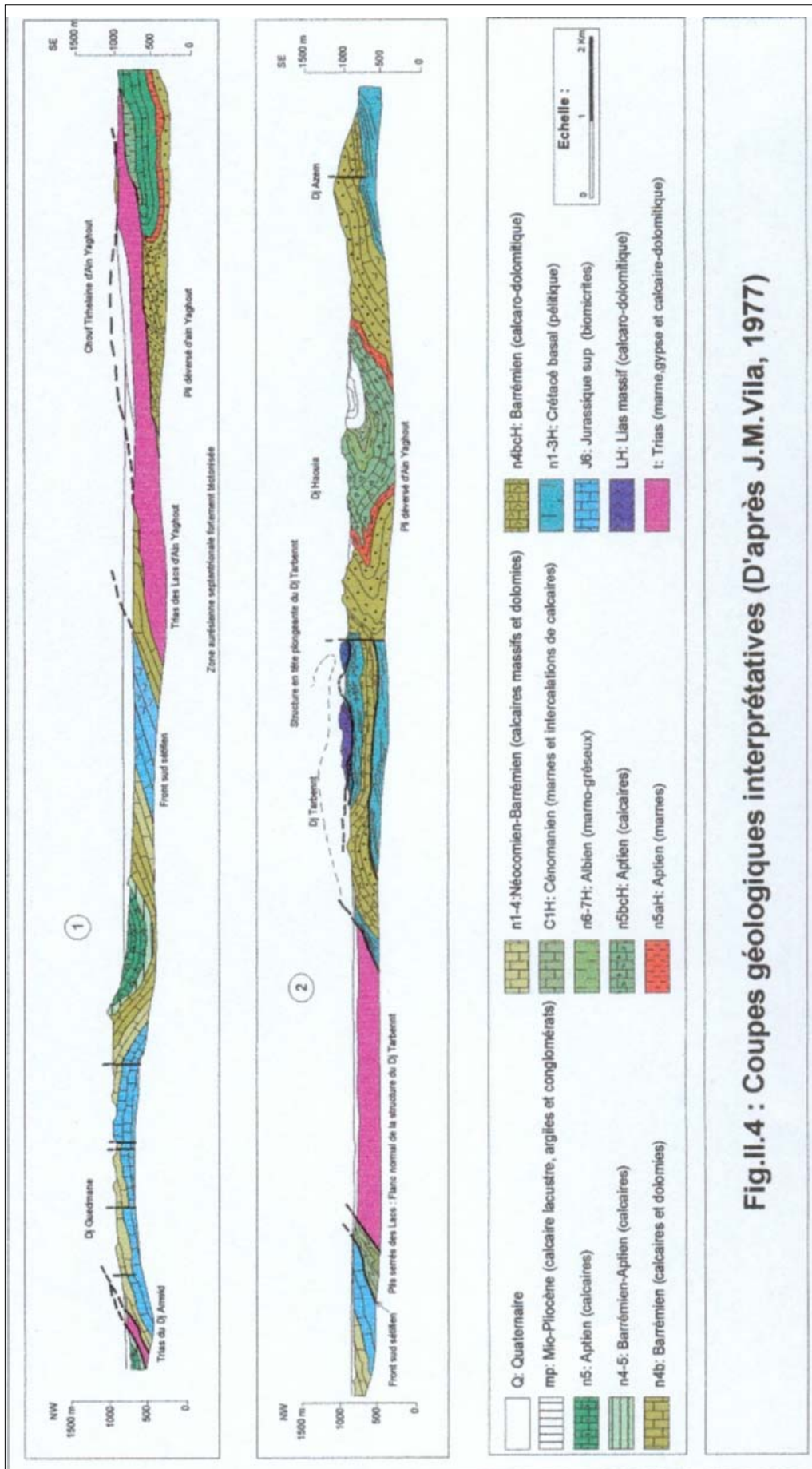


Fig.II.4 : Coupes géologiques interprétatives (D'après J.M.Vila, 1977)

Conclusion :

Les grands massifs montagneux de la région d'étude sont principalement constitués de formations rocheuses à dominance carbonatée et formant une série lithologique continue du Lias au Crétacé.

Les vastes étendues rencontrées entre les massifs montagneux sont constituées par des calcaires, des argiles, des conglomérats, des alluvions et des glaciaires polygéniques en particulier.

A partir de la nature lithologique du secteur étudié, nous avons classé ces formations en trois catégories :

1. Formations favorables pour constituer des aquifères à porosité d'interstice :

Les formations qui peuvent constituer un aquifère à porosité d'interstice sont :

- **Les dépôts du Mio-Plio-Quaternaire:** constitués par des calcaires lacustres, des conglomérats et des dépôts de piémonts.
- **Les formations de l'allochtone Sud Sétifien :** qui sont :
 - Les micrites de l'Aptien.
 - Les grès du Barrémien.
- **Les formations de l'autochtone et parautochtone auréliens :** qui sont :
 - Les grès du Tortonien.
 - Les conglomérats du Miocène inférieur.
 - Les grès de l'Aptien inférieur.
 - Les grès du Barrémien.

2. Formations favorables pour constituer des aquifères karstiques :

Les formations qui peuvent constituer un aquifère karstique sont :

- **Les formations de l'allochtone Sud Sétifien :** Il s'agit :
 - Des calcaires de l'Aptien et du Barrémien.
 - Des calcaires et les dolomies du Néocomien-Barrémien.
 - Des calcaires du Jurassique supérieur.
- **Les formations de l'autochtone et parautochtone auréliens :** Il s'agit
 - Des calcaires dolomitiques de l'Aptien supérieur, du Barrémien et du Lias.
 - Des calcaires du Tithonique-Berriasien.

3. Formations imperméables :

Les différents horizons aquifères de la région sont séparés par des terrains imperméables appartenant aux **formations de l'autochtone et parautochtone auréliens**. On y rencontre :

- Les marnes grises du Cénomaniens moyen-supérieur.
- Les marnes de l'Albien et de l'Aptien inférieur.
- Les marnes et les argiles pélitiques du Valanginien-Hautérvien.
- Les marnes du Jurassique supérieur et du Lias supérieur.
- Le gypse bréchiqque et les marnes bariolées du Trias.

CHAPITRE III

CADRE GEOPHYSIQUE

Introduction :

Pour toute étude hydrogéologique, la connaissance de la géologie est primordiale, mais elle est limitée par le manque d'affleurement des formations lithologiques.

De ce fait, l'étude géophysique est d'un apport précieux, car elle permet de compléter ou de confirmer l'étude géologique et de déterminer les zones susceptibles d'être aquifères.

L'étude géophysique faite dans notre région d'étude a été effectuée entre 1969 et 1970 par la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G), en vue d'examiner les différentes possibilités aquifères dans la région et leurs potentialités en eau ainsi que leur alimentation.

III.1.Problèmes et objectifs de l'étude de la C.G.G :

Les problèmes étaient de rechercher les implantations possibles d'ouvrage dans la plaine pour solliciter d'une part la nappe profonde du Crétacé ou du Jurassique, et d'autre part les éventuels aquifères du recouvrement.

Les objectifs d'étude étaient de déterminer la profondeur du substratum susceptible d'être aquifère, d'étudier la tectonique de la région, et enfin de rechercher dans le remplissage les possibles niveaux perméables (calcaires lacustres, dépôts des piémonts, grès et conglomérats ...).

III.2. Travaux effectués :

III.2.1.Répartition des sondages électriques :

La méthode adoptée dans l'étude de la C.G.G était celle des sondages électriques verticaux avec les dispositifs quadratiques rectilignes AMNB de Schlumberger, dont les différentes longueurs de la ligne AB varient entre 1000 et 3000 m.

Environ 100 sondages électriques regroupés en profils orientés SE - NW et N - S répartis dans la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout ont été exécutés. (Fig.III.1)

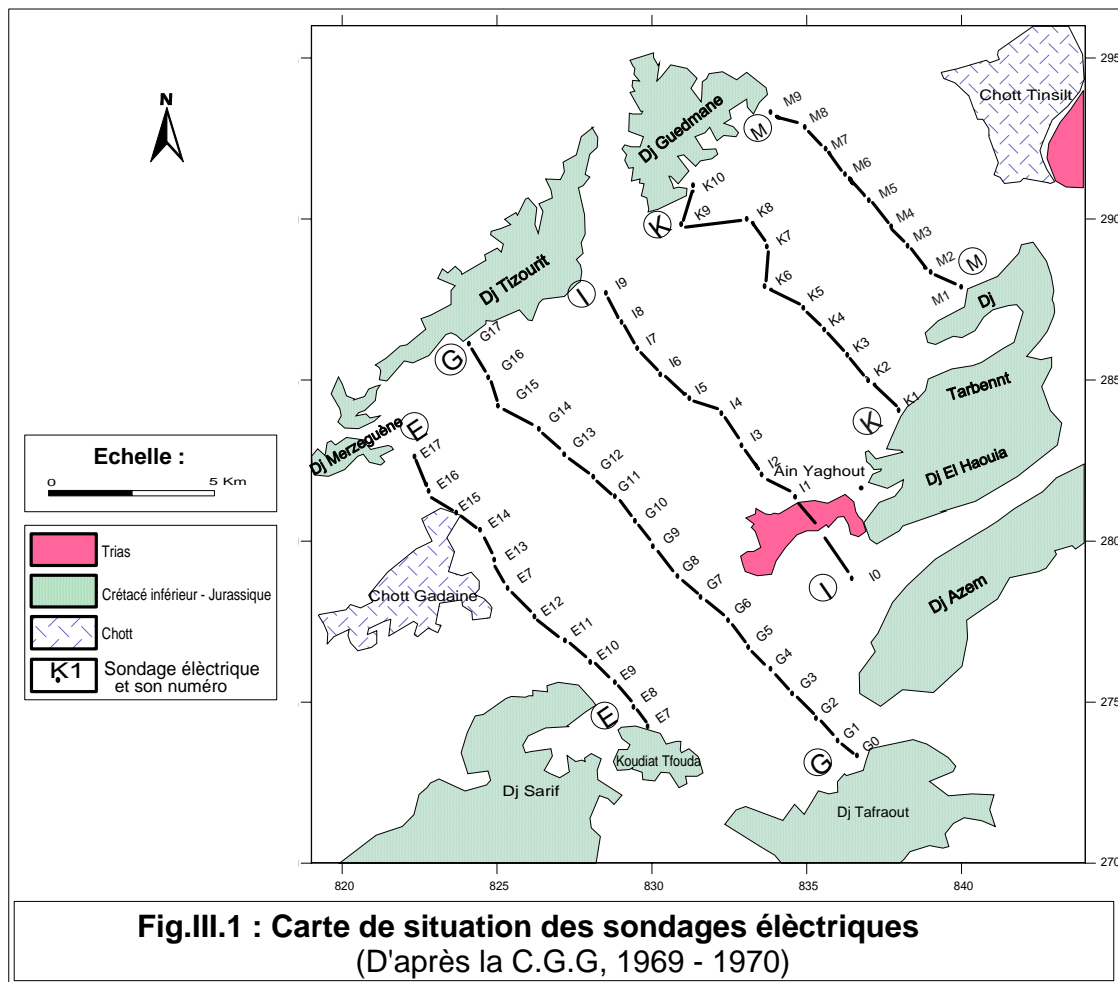
III.2.2.Echelle de résistivité :

Les mesures pratiques et l'estimation statistique déduite de l'ensemble de sondages électriques, ont permis d'établir une échelle de résistivité. (Tab.III.1)

III.3.Examen des résultats et interprétation :

L'étude géophysique effectuée par la C.G.G a permis d'établir pour notre secteur d'étude :

1. Des coupes géo-électriques.
2. Une carte de résistivité en ligne AB = 3000 m.



Tab.III.1 : Echelle de résistivité

Formations	Résistivité
Terrains salés des chotts.	0.5 – 2
Argiles du Plio-Quaternaire.	02 – 10
Sable argileux et graviers du Plio-Quaternaire.	10 – 50
Calcaires lacustres du Pliocène (chott Tinsilt).	15 – 50
Marne miocène éventuelle non étalonnée.	02 – 05
Conglomérats du Miocène (bordures des massifs).	100 – 150
Marnes du Sénonien.	05 – 10
Calcaires du Cénomaniens ou du Turonien.	100 – 150
Marnes cénomaniennes.	02 – 05
Grès et calcaires du Crétacé inférieur.	100 – 300
Marnes valanginiennes.	10 – 20
Calcaires jurassiques.	100 - 500

3. Une carte de résistivité en ligne AB = 1000 m.
4. Une carte des affleurements de surface.
5. Une carte du substratum.
6. Une carte tectonique.

III.3.1. Coupes géo-électriques :

L'examen des coupes géo-électriques effectuées dans la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout (Fig.III.2 : a et b), nous permet de constater la disposition suivante :

- Les formations très résistantes ont une résistivité qui varie entre (100 – 300) $\Omega \cdot m$, elles correspondent aux calcaires et aux dolomies du Crétacé et du Jurassique.

En surface, cette étude montre que ces formations présentent une structure plissée sous forme de Djebels tels que : Dj Merzguène et Dj Sarif, et des synclinaux comme la plaine de Gadaïne et d'Ain Yaghout.

Ces structures présentent des accidents transversaux importants de direction SW – NE provoquant la remontée du substratum.

- Les formations résistantes sont séparées en certains endroits les unes des autres par des formations conductrices de 3 à 5 $\Omega \cdot m$. Ces dernières correspondent aux argiles et aux marnes de l'Albien et du Néocomien. On note également l'existence de formations triasiques à Ain Yaghout et à Dj Sarif, provoquant un plan de charriage important dont le charriage de Dj Sarif qui recouvre probablement les calcaires du Cénomaniens. Ces formations sont très puissantes notamment vers les bordures des reliefs.

- Le recouvrement est constitué par des formations conductrices (argileuses) peu profondes en bordure de la plaine. Par contre, il est très profond (plus de 500 m) dans les zones de subsidence et sous les formations résistantes.

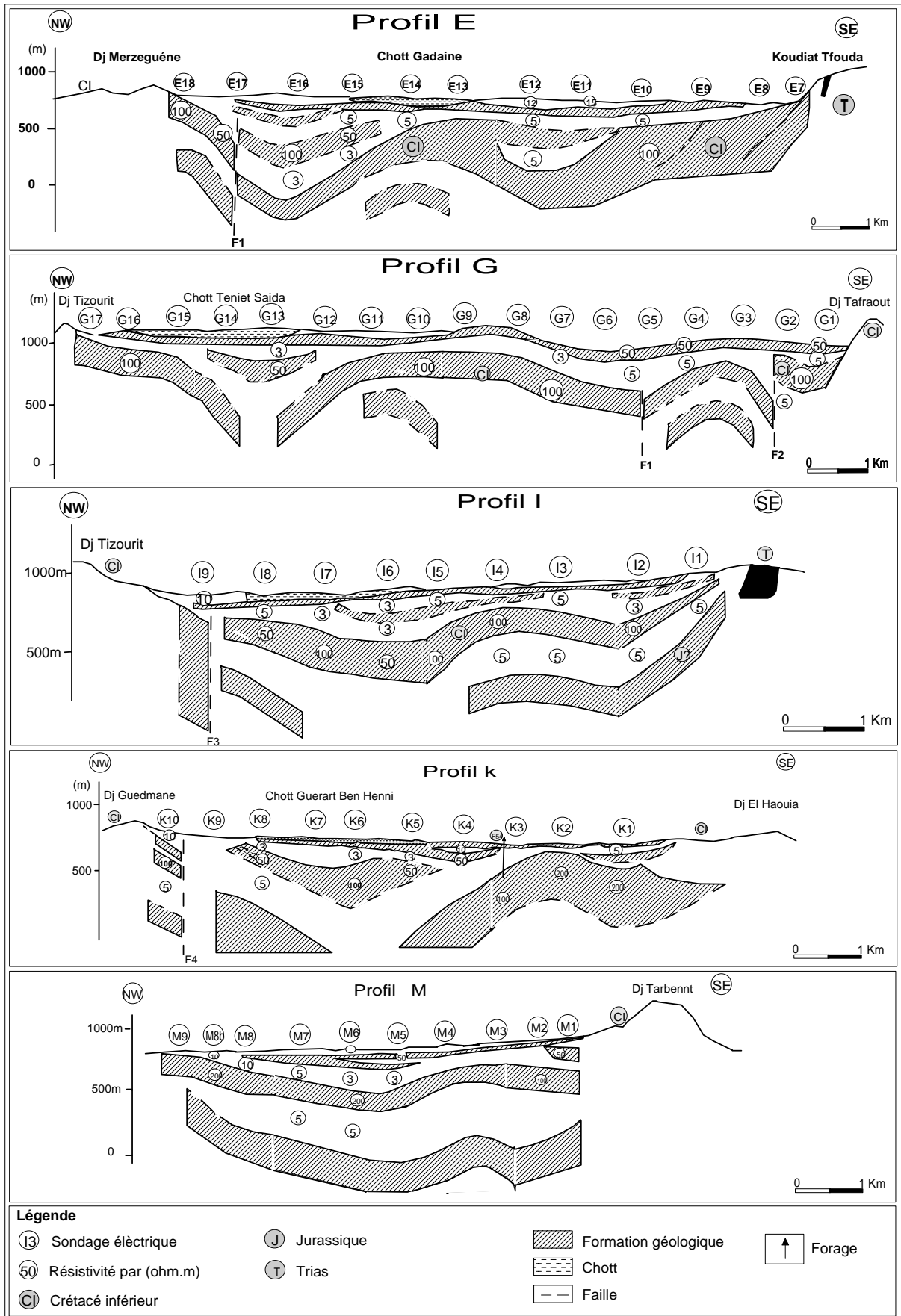
- Notons enfin, une zone sursalée en surface, ayant des résistivités très faibles de l'ordre de 0.5 à 2 $\Omega \cdot m$.

III.3.2. Carte de résistivité en ligne AB = 1000 m :

Cette carte a été établie afin de déterminer les niveaux grossiers résistants du recouvrement qui se trouvent entre 100 et 250 m de profondeur (Fig.III.3).

On note la présence d'une large zone conductrice allongée selon une direction NE – SW et qui correspond aux chotts, aux sables argileux et graviers du Plio-Quaternaire avec une résistivité comprise entre 5 et 30 $\Omega \cdot m$.

En bordure, on a des formations résistantes notamment les calcaires du Cénomano-Turonien, les conglomérats et les calcaires gréseux du Miocène.



III.3.3. Carte de résistivité en ligne AB = 3000 m :

Cette carte a permis de donner la répartition des résistivités entre 300 et 750 m de profondeur (Fig.III.4). Les résistivités enregistrées varient de 5 à 150 $\Omega \cdot m$, ce qui explique la répartition des zones conductrices dans la plupart de la plaine et qui correspondent à des formations de remplissage des synclinaux qui sont très épais. Les courbes d'iso-résistivités montrent une augmentation de cette dernière de 50 à 150 $\Omega \cdot m$ car les formations sont résistantes à l'exception des pointements Triasiques d'Ain Yaghout et de Dj Sarif, où la résistivité est de l'ordre de 8 à 20 $\Omega \cdot m$.

Aux bordures de Dj Merzguène, on constate la présence de formations résistantes du Crétacé moyen à faible profondeur qui correspondent au prolongement du massif de Mestaoua sur un compartiment de la grande faille.

III.3.4. Carte des affleurements de surface :

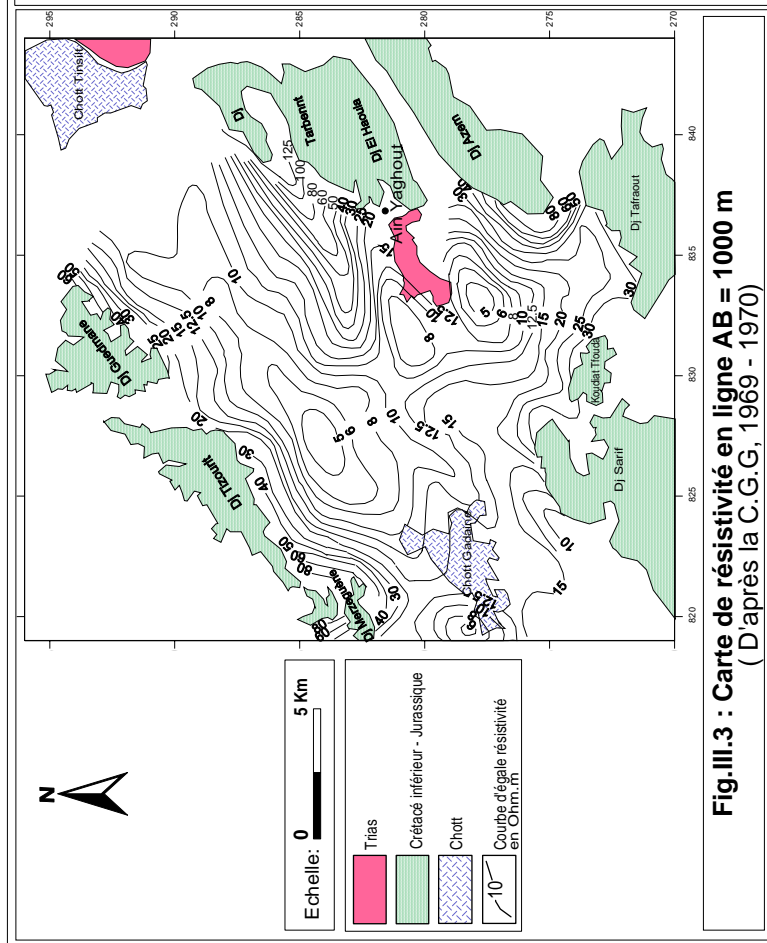
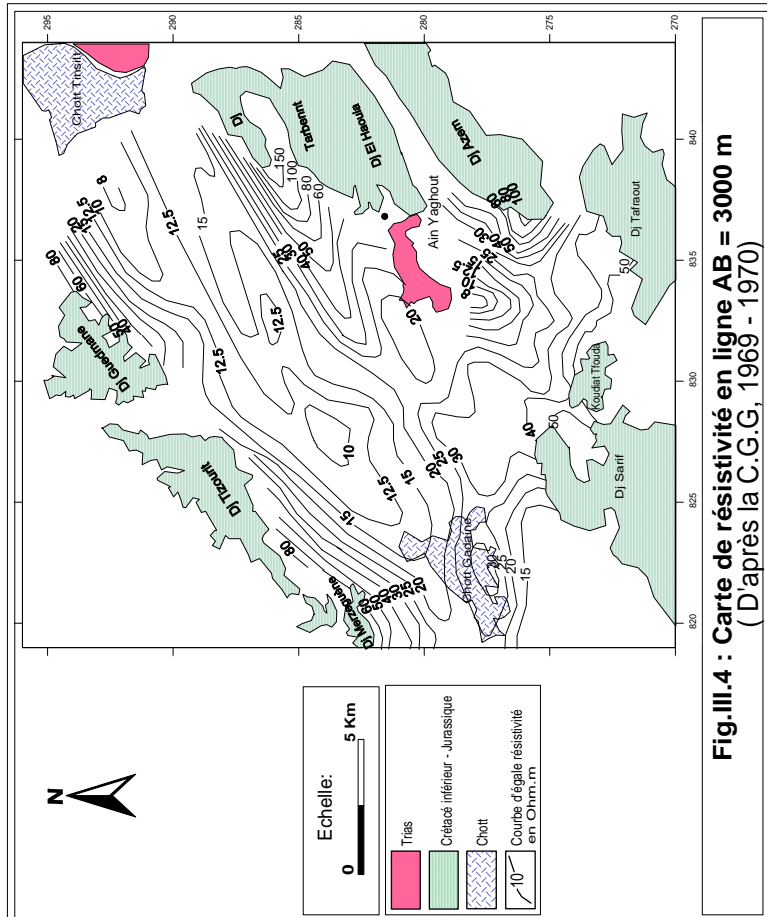
Cette carte est le résultat de la synthèse de cinq coupes géo-électriques (Fig.III.5). Elle permet d'avoir une vue latérale de l'aquifère superficielle. Cette carte traduit la répartition des formations résistantes et conductrices en surface. Cette répartition montre que le recouvrement résistant occupe presque 30 % de la surface de la plaine, il s'agit donc d'une nappe superficielle libre dans sa majorité. Plus on s'éloigne des massifs, plus la surface devient sursalée. Donc on constate une variation latérale des formations de surface depuis les massifs, jusqu'au centre de la plaine (résistantes, salées et sur salées).

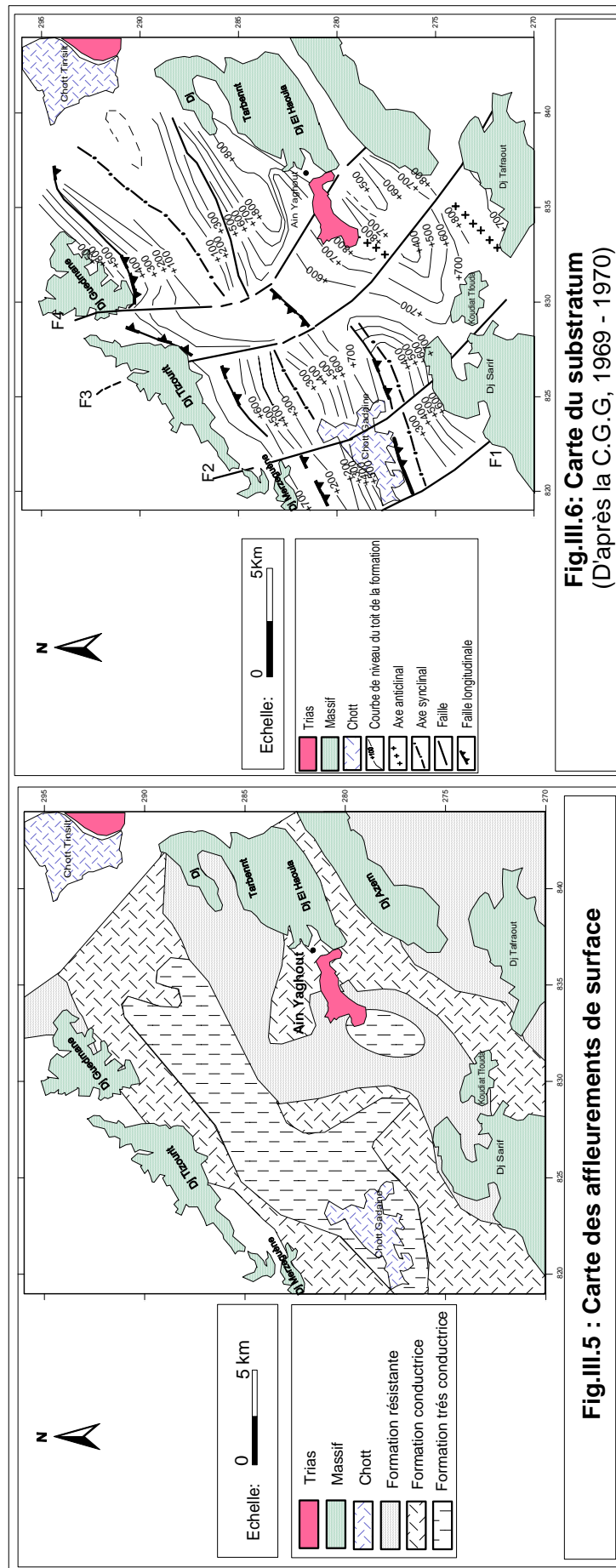
III.3.5. Carte du substratum :

Le substratum est considéré comme étant la formation conductrice sur laquelle repose une épaisse formation résistante susceptible d'être aquifère (Fig.III.6). Ce sont en générale les calcaires du Crétacé inférieur et les calcaires du Jurassique. Ce substratum atteint la cote de 800 m dans la région d'Ain Yaghout sous forme ondulatoire.

En plus de l'analyse géologique de la morphologie du substratum, on utilise les données de géophysique pour localiser les zones de subsidences et les limites des formations du Quaternaire des piémonts, pour cela une carte du substratum a été établie sur la base des sondages électriques.

Cette carte montre l'irrégularité du fond de la cuvette. Cette topographie souterraine joue un rôle de premier plan dans l'écoulement souterrain et explique souvent les anomalies de cet écoulement. En examinant cette carte, il en ressort que l'allure du substratum de la région étudiée se caractérise par la présence de diverses structures d'une part, et une profondeur variable d'un endroit à un autre (fosse d'effondrement, soulèvement) d'autre part.





La plaine de Gadaïne – AinYaghout correspond à une fosse d’effondrement qui s’étend de Gadaïne jusqu’au chott Tinsilt, allongée suivant la direction SW-NE.

Nous remarquons que la cote du substratum diminue des zones de piémont vers le centre de la plaine de 600 à 100 m.

On note, enfin que le substratum est affecté par de grands accidents tectoniques ($F_1, F_2, F_3 \dots$), de direction SW-NE qui ont compliqué la structure profonde du substratum. En fait ces formes tectoniques favorisent la présence des zones importantes d’accumulation des eaux souterraines.

Conclusion :

L’interprétation de l’étude géophysique effectuée dans la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout nous a apporté de précieuses informations concernant l’aquifère du Mio-Plio-Quaternaire et celui du Crétacé – Jurassique :

- Les formations du remplissage mio-plio-quaternaire correspondant aux conglomérats, calcaires, calcaires lacustres, marnes et argiles, ont des épaisseurs importantes (de l’ordre de 500 m au cœur du synclinal de la zone marécageuse).
- Le recouvrement est en général conducteur et contient quelques intercalations plus résistantes.
- Les formations carbonatées du Crétacé et du Jurassique constituent l’aquifère profond qui est facilement exploité près des massifs (c.à.d à proximité des accidents de bordures des plates formes).
- Les failles affectant les formations carbonatées constituent un champ important pour le développement du karst et assurent les relations hydrogéologiques entre les ensembles aquifères du Mio-Plio-Quaternaire et du Crétacé – Jurassique. Ces relations peuvent exister aussi lorsqu’il n’y a pas un écran imperméable entre ces deux ensembles.

CHAPITRE IV
CADRE HYDROCLIMATOLOGIQUE

Introduction :

L'étude hydroclimatique est basée sur les données des précipitations, des températures, des vents, de l'humidité.... Elle permet de définir le bilan hydrologique en se basant sur l'évapotranspiration réelle, le ruissellement et l'infiltration qui participe à l'alimentation et au renouvellement des aquifères.

IV.1. Zone d'étude et réseau hydroclimatique :

Le bassin versant des hautes plaines constantinoises (N°7 d'après la codification de l'A.N.R.H) a une superficie de 9587 km², et il est subdivisé en sept sous bassins, la zone d'étude fait partie du sous bassin (07- 03), (Fig.IV.1 et IV.2).

Pour cette étude, les coordonnées des stations concernées sont présentées dans le tableau IV.1 :

Tableau IV.1 : Coordonnées Lambert et internationales des stations météorologiques utilisées.

Station	X (km)	Y (km)	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Ain Yaghout	836.00	281.60	6° 25' 6''	35° 47'15 N	876.00
Ain Skhouna	832.50	274.98	6° 22'30''	35° 42'69 N	827.00

IV.2. Analyse des paramètres climatologiques :

Nous avons utilisé les données relatives aux stations climatologiques de : Ain Yaghout et Ain Skhouna, dont les données disponibles sont :

Pour Ain Yaghout :

- Série ancienne (1913 – 1938) : Précipitation et température.
- Série récente (1984 – 2000) : Précipitation et température.

Pour Ain Skhouna :

- Série ancienne (1913 – 1938) : Précipitation et température.
- Série récente (1984 – 2000) : Précipitation, humidité, vents, insolation et gelée.

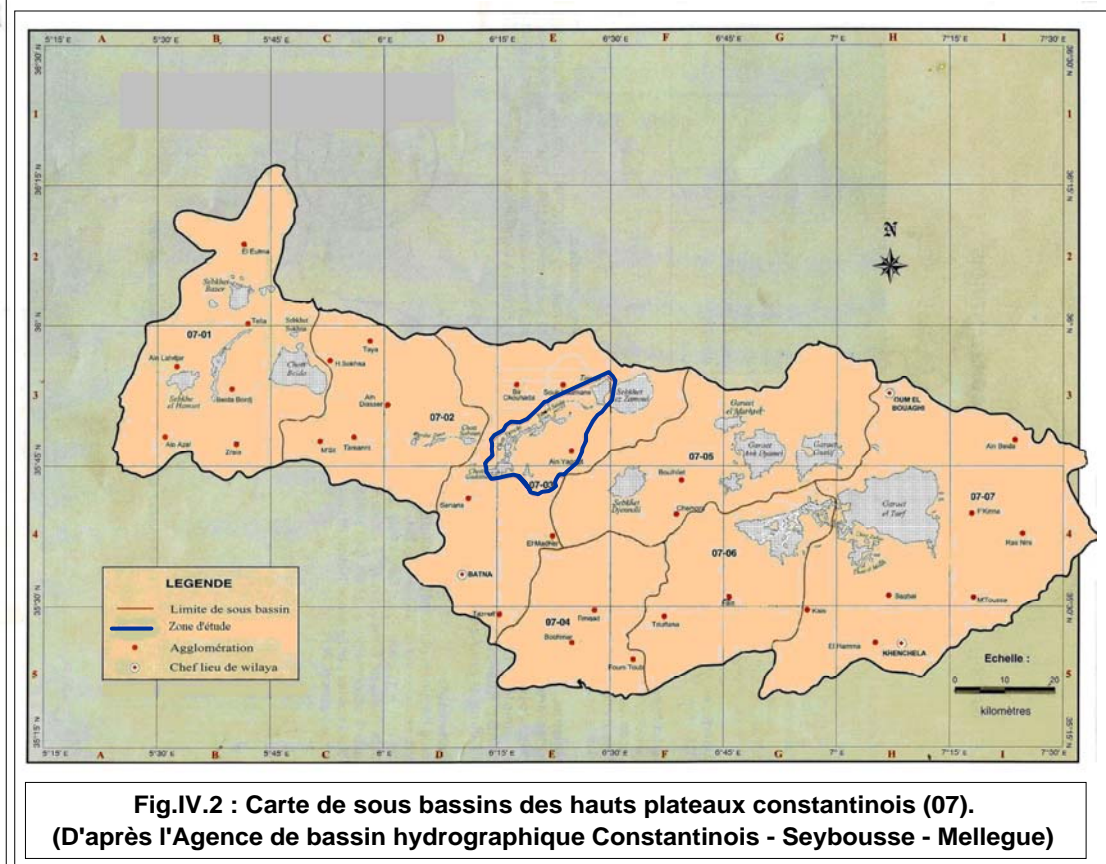
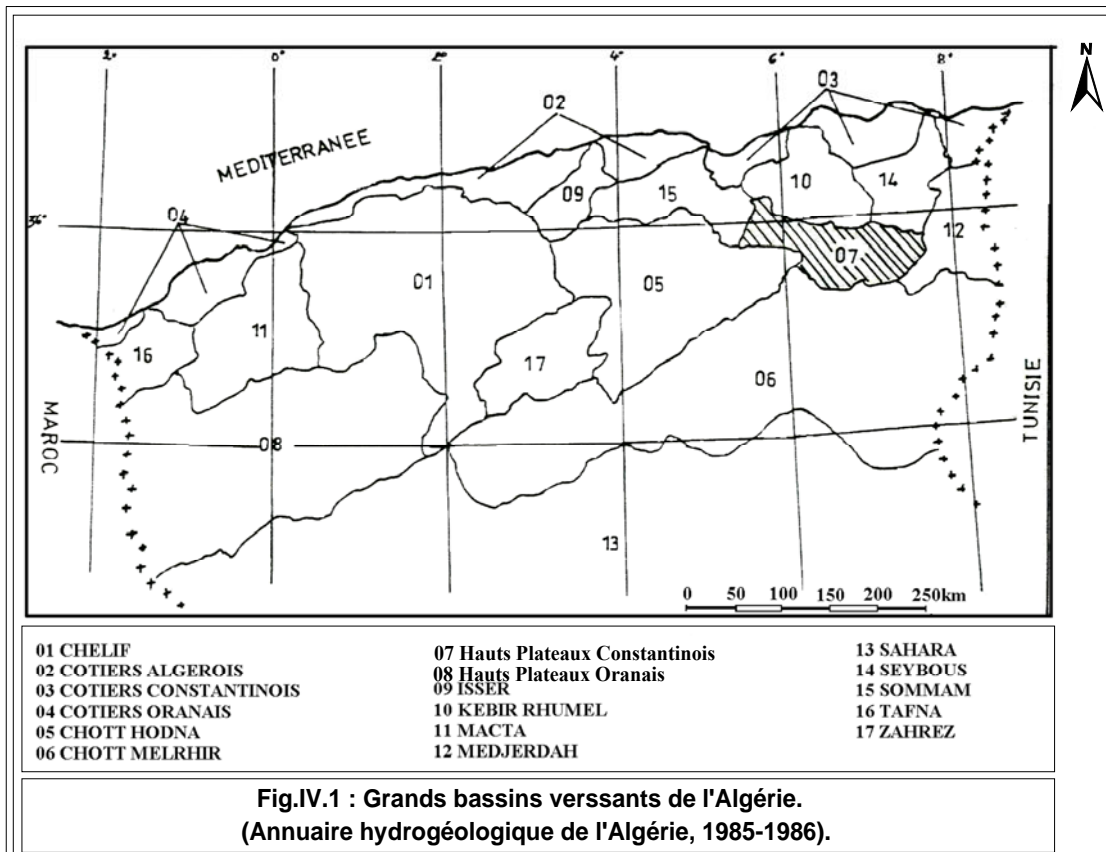
IV.2.1. Précipitation :

La précipitation est la totalité de la lame d'eau quantifiée par la pluviométrie. Elle est d'origine diverse : pluie, neige, grêle...etc.

IV.2.1.1. Répartition mensuelle et saisonnière des précipitations :

➤ **Période ancienne :**

Pour cette période, les données disponibles sont relatives à la station d'Ain Yaghout et elles sont mentionnées dans le tableau IV.2.



- Les mois de Mars et Mai sont les plus pluvieux alors que les mois les plus secs sont respectivement Juillet et Août.
- La saison la plus humide est le printemps avec une précipitation de l'ordre de 120 mm.

Tableau IV.2: précipitations moyennes sur 25 ans d'observations à la station d'Ain Yaghout.
Série ancienne de P. Seltzer (1913 – 1938).

Mois Station		Automne			Hiver			Printemps			Eté			Année
		Sept	Oct.	Nov	Déc	Jan	Fèv	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	
Ain Yaghout	P mensuelle	23	31	35	26	38	33	42	37	41	28	06	13	353 mm
	P saisonnière	89			97			120			47			
	P saisonnière (%)	25.21			27.48			34			13.31			100 %

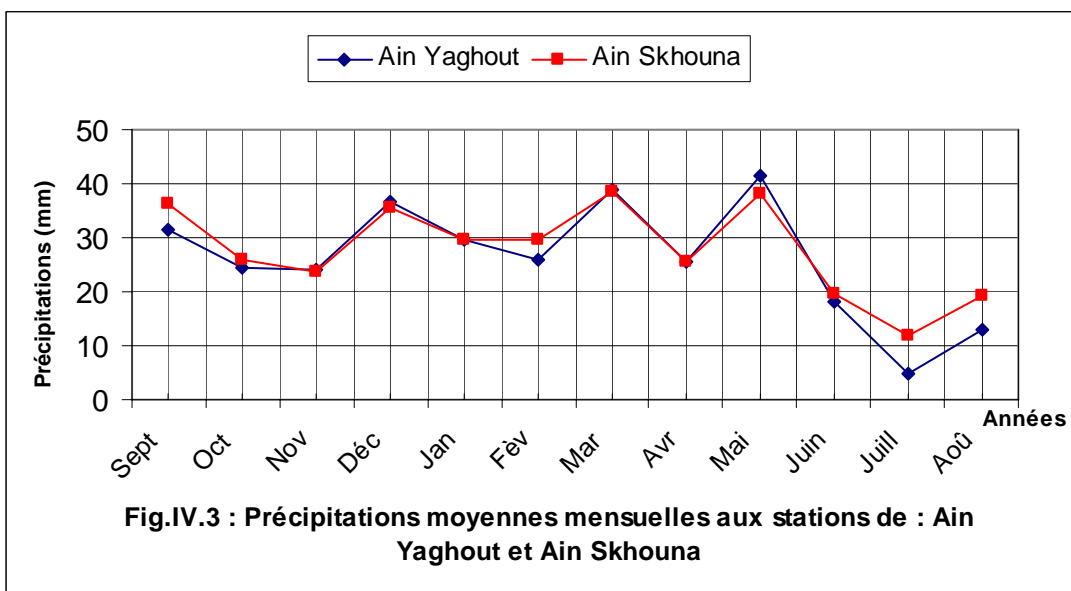
➤ **Période récente :**

Le tableau IV.3 résume la répartition moyenne mensuelle et saisonnière des précipitations dans les stations suivantes : Ain Yaghout et Ain Skhouna, (Fig.IV.3).

- Le maximum des précipitations moyennes mensuelles observé est:
 - 41.36 mm à Ain Yaghout durant le mois de Mai.
 - 38.7 mm à Ain Skhouna durant le mois de Mars.
- Le minimum des précipitations moyennes mensuelles est observé au mois de Juillet avec :
 - 4.9 mm à Ain Yaghout.
 - 11.9 mm à Ain Skhouna.

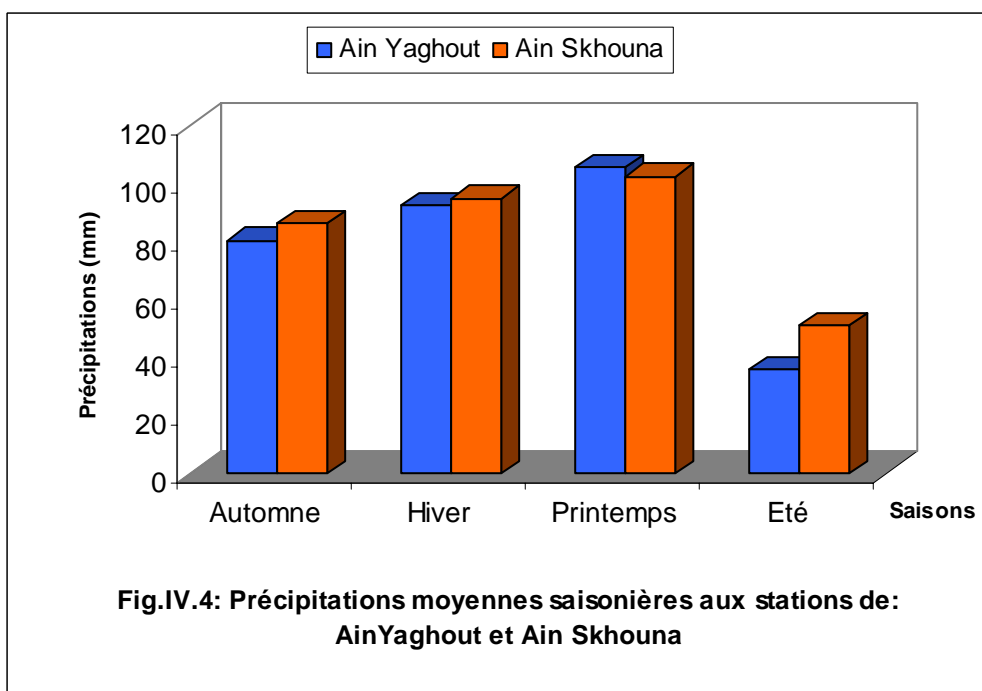
Tableau IV.3 : Précipitations moyennes aux stations d'Ain Yaghout et Ain Skhouna.

Mois Station		Automne			Hiver			Printemps			Eté			Année
		Sept	Oct.	Nov	Déc	Jan	Fèv	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	
Ain Yaghout	P mensuelle	34.36	25.1	31.96	40.96	32.41	24.78	28.86	34.4	41.36	17.34	4.9	15.41	331.84 mm
	P saisonnière	91.42			98.15			104.62			37.65			
	P saisonnière (%)	27.54			29.58			31.52			11.35			99.99 %
Ain Skhouna	P mensuelle	36.4	26.1	23.7	35.4	29.6	29.7	38.7	25.7	38	19.8	11.9	19.2	334.2 mm
	P saisonnière	86.2			94.7			102.4			50.9			
	P saisonnière (%)	25.79			28.34			30.64			15.23			100 %



- Pour le régime saisonnier, la saison la plus pluvieuse est le printemps pour les deux stations avec :
 - 104.62 mm à Ain Yaghout.
 - 102.4 mm à Ain Skhouna.
- La saison la plus sèche est l'été avec :
 - 37.6 mm à Ain Yaghout.
 - 50.9 mm à Ain Skhouna.

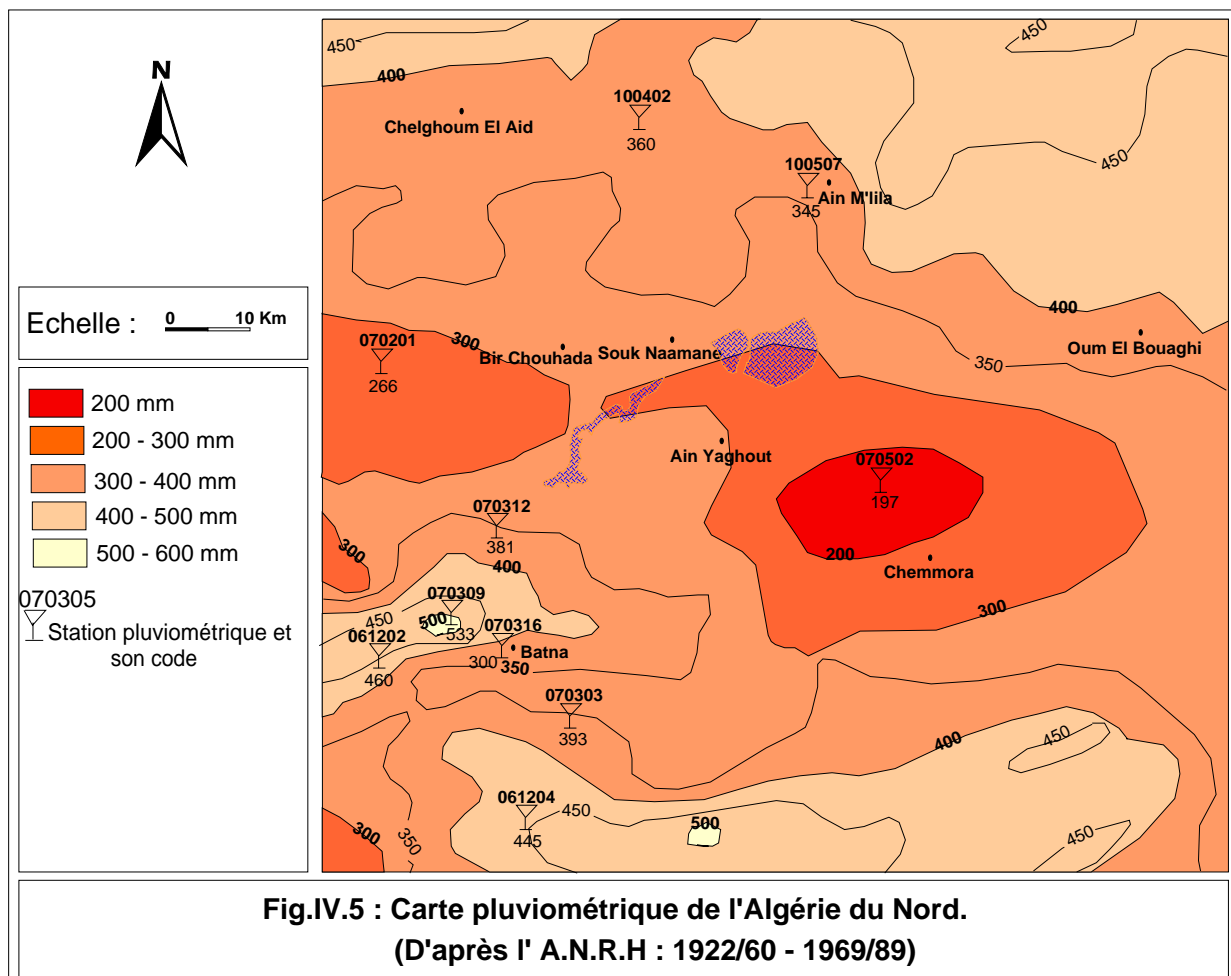
Le climat présente donc une période relativement pluvieuse regroupant l'hiver et le printemps, quand à la saison sèche, elle correspond à l'été et une partie de l'automne, (Fig.IV.4).



IV.2.1.2. Répartition annuelle des précipitations :

➤ Interprétation de la carte pluviométrique :

L'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H) a établi une carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à une échelle 1/500 000 pour une période de 60 ans (1922/60 – 1969/89) avec une équidistance de 50 mm ce qui lui donne une assez bonne précision, (Fig.IV.5). Cette carte reflète les traits essentiels de la distribution des précipitations dans le secteur d'étude. On s'aperçoit alors que la pluviométrie s'échelonne entre 300 et 400 mm dans la plaine, puis elle chute vers 200 à 300 mm dans l'Est et l'Ouest de la plaine, mais elle est maximale sur les hauteurs.



La variation pluviométrique annuelle pour chacune des stations utilisées est représentée dans les graphes (Fig.IV.6), dont :

- L'année la plus pluvieuse est 1995 pour la station d'Ain Yaghout, et 1985 pour la station d' Ain Skhouana.
- L'année la plus sèche est 1996 pour la station d'Ain Yaghout, et 1993 pour la station d'Ain Skhouana.

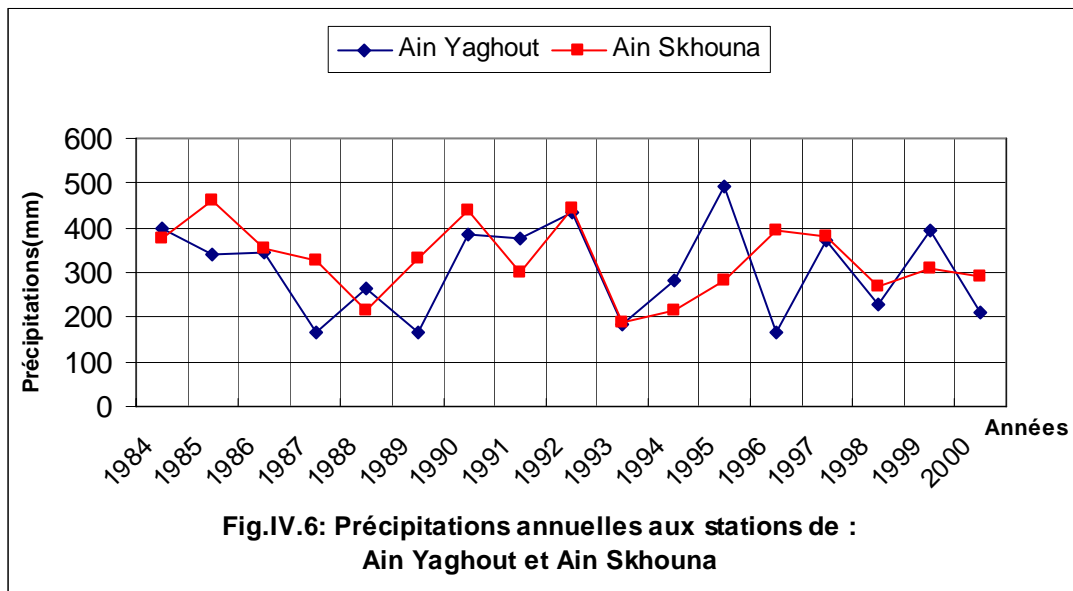


Fig.IV.6: Précipitations annuelles aux stations de :
Ain Yaghout et Ain Skhouna

IV.2.1.3. Calcul de la lame d'eau moyenne précipitée sur le sous bassin de « Sebket Ez Zemoul » :

La détermination de la moyenne pluviométrique est nécessaire pour l'étude de l'abondance pluviale, elle est égale au quotient des précipitations en (mm) par la superficie en (m²).

Pour estimer la pluie moyenne sur l'ensemble du sous bassin, nous prenons 12 stations pour une période de 60 ans (1922/1960-1969/1989).

Trois méthodes sont proposées pour le calcul de la lame d'eau précipitée, qui sont :

La méthode arithmétique, la méthode de Thiessen et la méthode des isohètes.

➤ **Méthode arithmétique :**

Elle s'obtient à partir de la formule : $\bar{P} \text{ (mm)} = \frac{\sum P_i}{n}$ (IV.1)

Où : \bar{P} : Précipitations moyennes à l'échelle du sous bassin versant, en (mm).

P_i : Pluviométrie annuelle de chaque station, en (mm).

n : Nombre de stations utilisées.

On a : $\bar{P} \text{ (mm)} = \frac{4326}{12} = 360,5 \text{ mm} \rightarrow$ Donc : $\bar{P} = 361 \text{ mm}$.

Tableau .IV.4 : Application de la méthode arithmétique

Station	Code	Pi (mm)	Station	Code	Pi (mm)
Ain M'lila	100507	345	Tazoult	070303	393
Teleghma	100402	360	Sgag	061204	445
Ain Djasser	070201	266	Ben Tennoune	070304	324
Seriana	070312	381	Ain Yaghout	070306	322
Kasserou	070309	533	Boulhilet	070502	197
Oued Echaaba	061202	460	/	/	$\Sigma = 4326$
Batna-Ferme	070316	300			

➤ **Méthode de Theissen :**

Les différentes stations réparties sur l'ensemble du sous bassin versant permettent de tracer les polygones ayant pour centre une de ces stations en considérant que la pluie moyenne relevée à chaque station correspond à celle tombée sur chaque polygone ayant pour centre la station qui lui correspond. (Fig.IV.7)

Ainsi, on calcule la surface de chaque polygone, la lame d'eau précipitée est donnée par la formule qui

suit :

$$\bar{P}(\text{mm}) = \frac{\sum P_i \times S_i}{S_t} \quad (\text{IV.2})$$

Où : \bar{P} : Précipitations moyennes à l'échelle du sous bassin versant, en (mm).

P_i : Pluviométrie moyenne annuelle de chaque station, en (mm).

S_t : Surface totale du sous bassin versant, en (km²).

S_i : Surface correspondante à chaque polygone, en (km²).

On a:

$$\bar{P} = \frac{53762,1}{1569,02} = 342,65 \text{ mm.} \quad \longrightarrow \quad \text{Donc : } \bar{P} = 343 \text{ mm.}$$

➤ **Méthode des isoyhètes :**

Son principe consiste à mesurer la surface existant entre les lignes d'égale pluviométrie (isoyhètes) par planimétrie, (Fig. IV.8). On multiplie cette surface (S_i) à chaque fois par la moyenne des valeurs des deux isoyhètes qui correspondent à cette surface, donc la lame d'eau précipitée sera égale à :

$$\bar{P} = \frac{\sum S_i \times P_i}{S_t} \quad (\text{IV.3})$$

On a : $\bar{P} = \frac{582942,5}{1586} = 367,55 \text{ mm} \quad \longrightarrow \quad \text{Donc : } \bar{P} = 368 \text{ mm}$

On remarque que la méthode arithmétique et celle des isoyhètes donnent des résultats plus ou moins proches (Tab.IV.5), donc on adopte la valeur moyenne des ces deux méthodes.

Tableau IV.5 : Valeurs de la lame d'eau moyenne précipitée obtenues par les trois méthodes.

Méthode	Valeur de \bar{P} (mm)	\bar{P} adoptée
Arithmétique	361	364.5 mm
De Theissen	343	
Des isoyhètes	368	

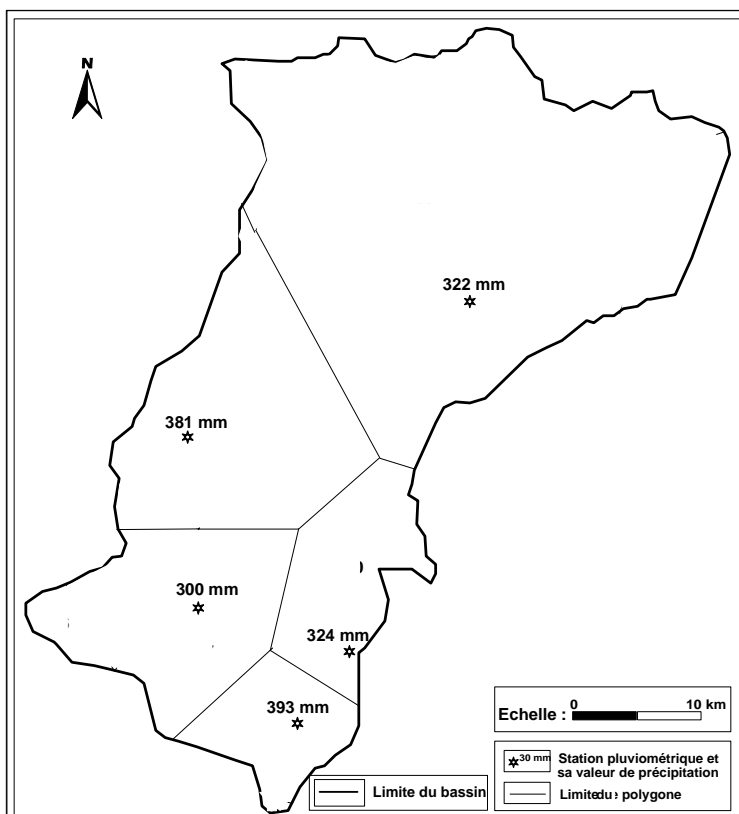


Fig.IV.7 : Calcul de la lame d'eau précipitée par la méthode de THEISSEN
(Période : 1922/60 - 1969/89)

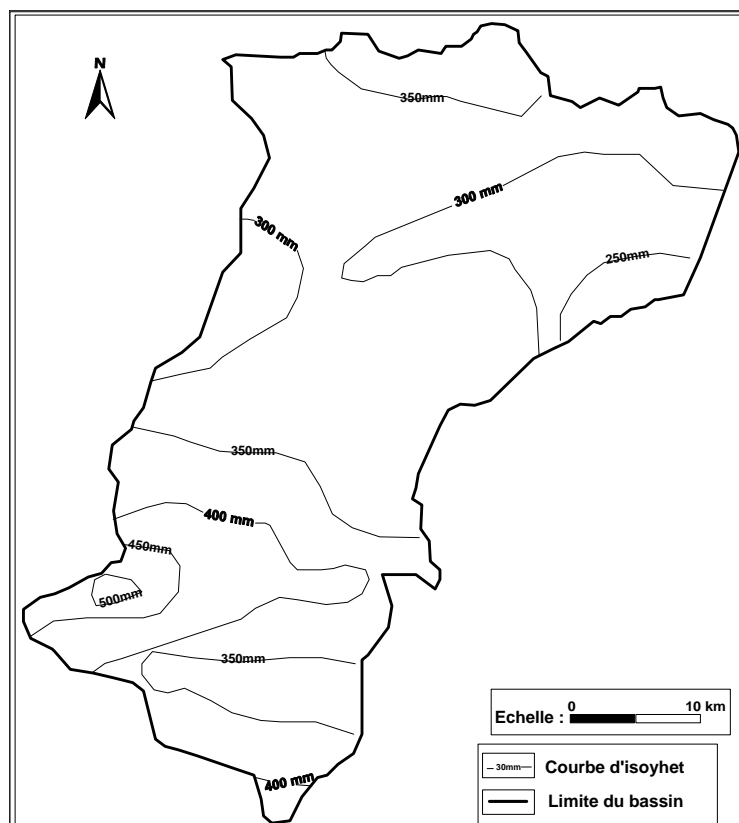


Fig.IV.8 : Calcul de la lame d'eau précipitée par la méthode des isohyets
(Période : 1922/60 - 1969/89)

IV.2.2. Température de l'air :

La température de l'air est un paramètre ayant une grande influence sur le bilan hydrologique. Elle conditionne l'évaporation et l'évapotranspiration.

Le tableau (IV.6) montre les variations moyennes mensuelles de la température pour la station d'Ain Skhouna durant la période « 1984-2000 ».

Selon le tableau (IV.6) :

- La température moyenne de l'été est de 23.28C° et celle de l'hiver est de 6.13C°.
- Les températures atteignent le maximum au mois de Juillet avec (32.4C°) et Août avec (32.3C°).
- La température moyenne durant la période d'observation (1984-2000) est de l'ordre de 14.24C°.

Tableau.IV.6 : Températures moyennes mensuelles et annuelles pour la station d'Ain Skhouna durant la période (1984-2000).

saïson	Automne			Hiver			Printemps			Eté			moyenne Annuelle
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
T° moy max (M)	27.3	21.6	15.6	11.6	10.3	12.5	14.7	18.1	23.9	29.1	32.4	32.3	20.8
T° moy min (m)	13.5	9.2	4.6	1.6	0.2	0.6	2.4	4.9	9.5	13.7	15.9	16.3	7.7
T° moy (M+m)/2	20.4	15.4	10.1	6.6	5.25	6.55	8.55	11.5	16.7	21.4	24.15	24.3	14.24
	15.3			6.13			12.25			23.28			

Max : La température moyenne mensuelle des maximas (C°).

Min : La température moyenne mensuelle des minimas (C°).

(Max+Min)/2 : La température moyenne mensuelle (C°).

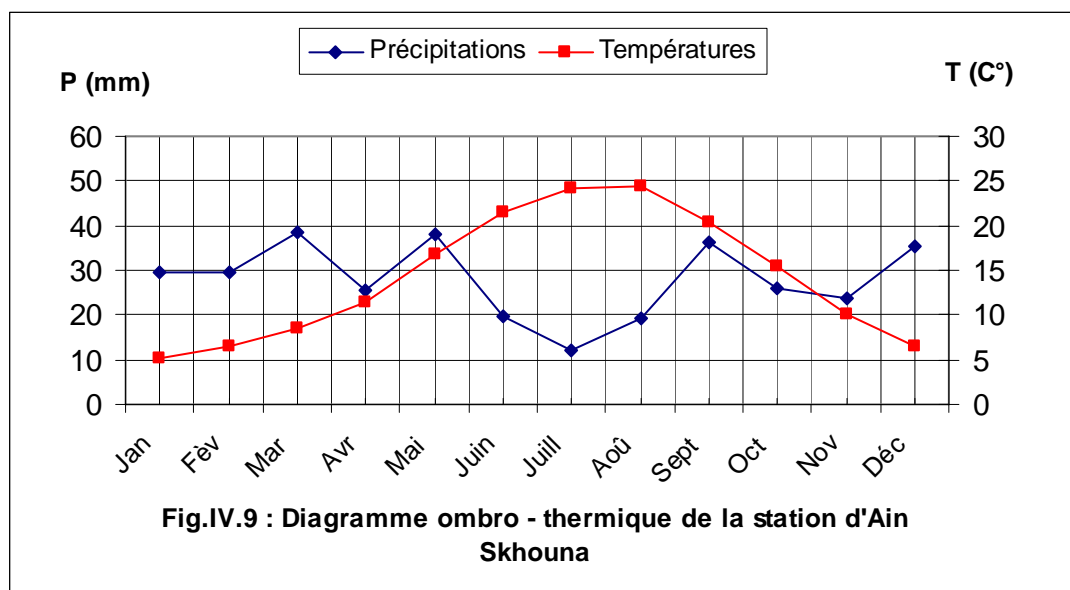
IV.2.3. Relation température-précipitation :

IV.2.3.1. Diagramme ombro-thermique de Gaussen et Bagnouls :

Le diagramme ombro-thermique (Fig. IV.9) est établi selon la méthode de Gaussen et Bagnouls et où les précipitations sont reportées à l'échelle double des températures.

Cela permet de déterminer la période sèche durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations du mois est inférieure ou égale au double de la température ($P \leq 2T$).

D'après les deux courbes ombro-thermiques, nous constatons que la période déficitaire en eau (sèche) s'étale depuis la quatrième semaine de Mai jusqu'à la première semaine du mois de Novembre.



IV.2.3.2. Détermination de l'humidité du sol par la méthode d'Euverte :

Cette méthode consiste à l'établissement du rapport P/T qui nous permet de connaître l'évolution de l'humidité du sol. On distingue 4 régimes.

Si :

- $P/T < 1$: Le régime est très sec.
- $1 < P/T < 2$: Le régime est sec.
- $2 < P/T < 3$: Le régime est sub-humide.
- $P/T > 3$: Le régime est humide.

D'après le tableau IV.7:

- Le régime est très sec aux mois de : Juin, Juillet et Août.
- Le régime est sec aux mois de : Septembre et Octobre.
- Le régime est sub-humide aux mois de : Avril, Mai et Novembre
- Le régime est humide aux mois de : Décembre, Janvier, Février et Mars.

Tableau IV.7 : Valeurs du rapport P/T à la station d'Ain Skhouna (1984-2000).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	36.4	26.1	23.7	35.4	29.6	29.7	38.7	25.7	38	19.8	11.9	19.2
T (°C)	20.4	15.4	10.1	6.6	5.25	6.55	8.55	11.5	16.7	21.4	24.15	24.3
P/T	1.78	1.69	2.35	5.36	5.64	4.53	4.52	2.23	2.28	0.93	0.49	0.79

IV.2.3.3. Indice de De. Martone :

Le géographe De.Martone a défini l'indice d'aridité (A) en se basant sur la température et les précipitation selon la formule (IV.4) : $A = P / (T+10)$ (IV.4)

Où : **P** : La précipitation moyenne annuelle en (mm).

T : L température moyenne mensuelle en (C°).

A la station d'Ain Skhouna on a : $P = 334.2$ mm et $T = 14.24$ C $\rightarrow A = 13.79$.

De.Martone a proposé selon la valeur de (A) la classification suivante :

$20 < A < 30$: Le climat est tempéré.

$10 < A < 20$: Le climat est semi-aride.

$7.5 < A < 10$: Le climat est steppique.

$5 < A < 7.5$: Le climat est désertique.

$A < 5$: Le climat est hyper aride.

Dans notre cas, la valeur de (A) est comprise entre 10 et 20, donc il s'agit d'un régime semi-aride lié à la répartition saisonnière des températures et des précipitations.

IV.2.3.4. Climagramme de L.Emberger :

Pour situer le climat de la région étudiée, on utilise le climagramme d'Emberger (Fig. IV.11), qui est un abaque comportant en ordonnées les valeurs du Q_2 qui sont données par la relation (IV.5) et en abscisses la température moyenne des minimas de la saison froide.

$$Q_2 = 2000 [P / (M^2 - m^2)] \quad (IV.5)$$

Où : **P** : La précipitation moyenne annuelle, en (mm).

M : La température maximum du mois le plus chaud, en degré kelvin (K°).

m : La température minimum du mois le plus froid, en degré kelvin (K°).

Avec : $T (K^\circ) = T (C^\circ) + 273.15$ (IV.6)

A la station d'Ain Skhouna :

$$\left. \begin{array}{l} \bar{P} = 334.2 \text{ mm}, M = 32.4 + 273.15 = 305.55 \text{ K}^\circ \\ m = 0.2 + 273.15 = 273.35 \text{ K}^\circ \end{array} \right\} \rightarrow Q_2 = 36.07.$$

Le point A obtenu aux coordonnées (0.2, 36.07) montre que le climat à la station d'Ain Skhouna est de type : semi-aride, cela est concordant avec l'indice de De.Martone.

On peut dire que les différentes méthodes utilisées montrent que la région d'étude est caractérisée par une période sèche qui débute du mois de Mai et s'étale jusqu'au mois de Novembre ce qui lui donne un climat semi - aride et le met sous l'influence d'un régime méditerranéen en hiver et saharien en été.

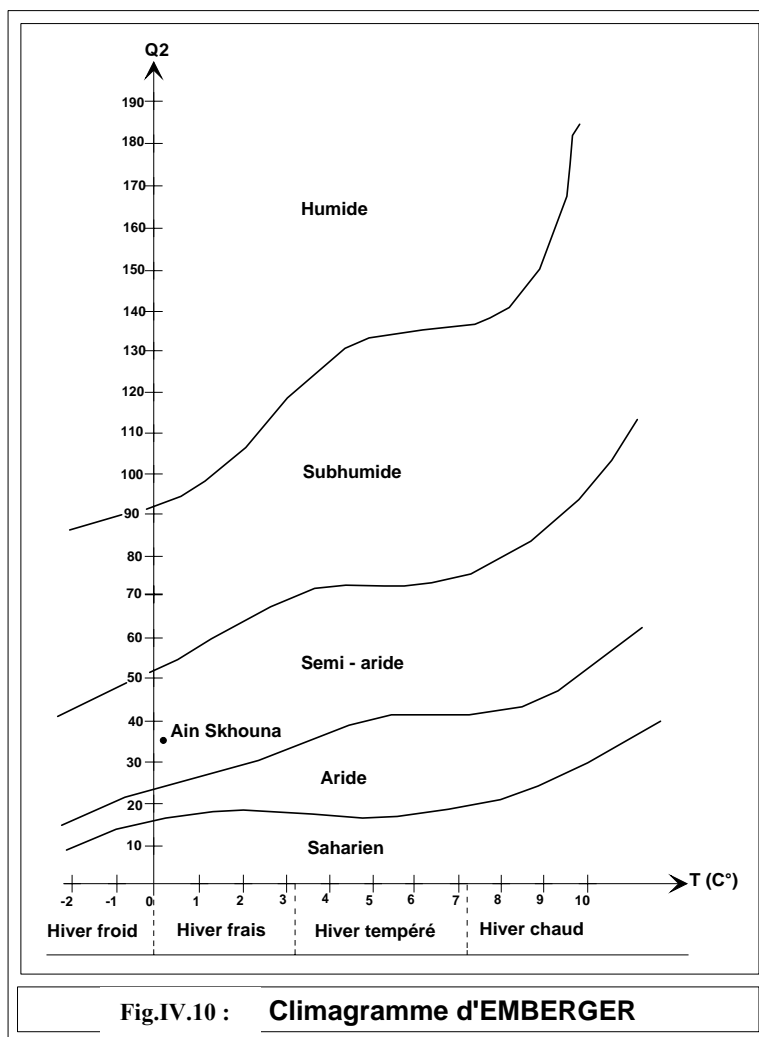


Fig.IV.10 : Climagramme d'EMBERGER

IV.2.4. Humidité :

Elle résulte de l'influence du soleil sur l'eau de surface ou du sol, et elle est exprimée par trois indicateurs : l'humidité absolue, l'humidité déficitaire et l'humidité relative.

D'après P.Seltzer l'humidité relative moyenne est déduite des lectures faites au Hygromètre à : 7 h 00, 13 h 00 et 18 h 00 de la journée.

Selon le tableau IV.8, on remarque que les mois de Janvier et Décembre ont respectivement une moyenne maximale d'humidité (74% et 73%) et le mois d'Août enregistre une moyenne minimale d'humidité (42%).

Tableau IV.8 : Humidité relative en (%) à la station d'Ain Skhouna. Période (1984-2000).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne annuelle
Moyenne mensuelle En (%)	74	68	63	58	54	46	38	42	54	63	66	73	58

IV.2.5. Vent :

Le vent résulte des différents mouvements des masses d'air dans l'atmosphère à partir des champs de pression et de température.

Les vents les plus réguliers qui soufflent de l'Ouest et du Nord Ouest sont humides et ceux du Sud sont secs et font augmenter l'évapotranspiration.

Selon le tableau IV.9, on constate que la vitesse moyenne mensuelle maximale est enregistrée aux mois de Mai et Juin avec une vitesse de (3.8m/s), tandis que le mois d'Octobre enregistre une vitesse moyenne mensuelle minimale (2.9 m/s).

**Tableau IV.9 : vitesses moyennes mensuelles du vent à la station d'Ain Skhouna.
Période (1984-2000).**

saïson	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Moyenne annuelle
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Moyennes mensuelles en (m/s)	3.3	<u>2.9</u>	3.4	3.1	3.5	3.5	3.6	4.2	3.8	3.8	3.5	3.4	3.5

IV.2.6. Insolation:

Elle traduit la durée en h/j du rayonnement solaire sur une région donnée. Les valeurs sont consignées dans le tableau IV.10.

On remarque que les maxima de l'insolation sont enregistrés en été avec une valeur de 350 heures au mois de Juillet, tandis que les minima sont enregistrés en hiver avec une valeur de 166 heures au mois de Janvier.

**Tableau IV.10 : Valeurs moyennes mensuelles de l'insolation à la station d'Ain Skhouna.
Période (1984-2000).**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne mensuelle
Moyenne mensuelle en (h)	<u>166</u>	190	223	247	284	302	350	318	257	227	185	171	242

IV.2.7. Gelée :

La gelée blanche se manifeste en moyenne de 4 jour/an alors que la neige tombe en moyenne 1 jour/an.

IV.3. Evapotranspiration :

C'est la restitution de l'eau à l'atmosphère à partir d'une surface quelque soit sa nature : sol, végétation, surface d'eau libre, neige ou glace, par transformation de l'eau en vapeur. Ce processus est le résultat de deux phénomènes :

- L'évaporation (E) : s'effectue à partir des surfaces évaporantes, surfaces d'eau libre et les sols humides.
- La transpiration (T) ou évaporation physiologique : est l'évaporation biologique des plantes.

IV.3.1. Evapotranspiration potentielle (ETP) :

Elle représente la température d'un couvert végétal en pleine croissance alimenté en eau continuellement. Cette grandeur correspond donc à un concept théorique et représente les possibilités maximales d'évaporation dans les conditions climatiques données.

Pour le calcul de ce paramètre, Thornthwaite a proposé la formule (IV.7) :

$$\mathbf{ETP = 16 [10T/I]^a \text{ (mm)} \quad \mathbf{(IV.7)}}$$

Où : **ETP** : L'évapotranspiration potentielle non corrigée, (mm).

T : La température moyenne mensuelle en C°.

I : L'indice annuel de chaleur, $\mathbf{(I = \sum_{i=1}^{12} i)}$. **(IV.8)**

i : L'indice mensuel de chaleur, $\mathbf{(i = (\frac{T}{5})^{1,514})}$. **(IV.9)**

a : L'exposant climatique, $\mathbf{(a = 0.016 I + 0.5)}$. **(IV.10)**

$$\mathbf{ETPc = ETP \cdot K \quad \mathbf{(IV.11)}}$$

Où : **ETPc** : L'évapotranspiration potentielle corrigée, (mm).

K : Le facteur de correction fonction de la durée d'ensoleillement.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau (IV.11) avec : I = 75.16 et a = 1.52.

Donc, **ETPc** = 785 mm, soit 234.88 % des précipitations.

**Tableau IV.11 : Calcul de l'ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Ain Skhouna.
Période (1984-2000).**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Année
P (mm)	36.4	26.1	23.7	35.4	29.6	29.7	38.7	25.7	38	19.8	11.9	19.2	334.2
T (c°)	20.4	15.4	10.1	6.6	5.25	6.55	8.55	11.5	16.7	21.4	24.15	24.3	14.24
I	8.41	5.49	2.90	1.52	1.08	1.51	2.25	3.53	6.21	9.10	10.85	10.95	63.80
ETP (mm)	93,09	60,60	31,98	16,73	11,85	16,73	24,92	38,96	68,77	99,78	120,3	121,2	704,9
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	/
ETPc (mm)	96	59	28	14	10	14	26	43	83	122	149	141	785

IV.3.2. Evapotranspiration réelle (ETR) et déficit d'écoulement :

C'est la quantité d'eau évaporée par le sol et la végétation, elle tient compte de la lame d'eau de la surface évaporante, celle-ci est inférieure ou égale à l'ETP qui correspond à une restitution hydrique maximale à l'atmosphère.

Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes, parmi lesquelles nous pouvons cité :

➤ Formule de Turc :

Elle est valable pour tout type de climat. Elle est fonction de la précipitation et de la température.

$$ETR = P / \sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}} \quad (IV.12)$$

Où : **ETR** : L'évapotranspiration réelle, en (mm).

P : La précipitation annuelle, en (mm).

L : Un paramètre calculé en fonction de la température selon la formule :

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (IV.13)$$

T : La température moyenne annuelle en C°.

*Application numérique :

$$P = 334.2 \text{ mm} \quad T = 14.24 \text{ C}^\circ \quad \rightarrow \quad L = 800.38$$

On aura donc : ETR = 322 mm, soit 96.34 % des précipitations.

➤ Formule de Coutagne :

Cette formule fait intervenir la pluviométrie et la température comme suit :

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (IV.14), \quad \text{avec : } \lambda = 1 / 0.8 + 0.14T \quad (IV.15)$$

Cette formule n'est valable que pour des valeurs du P comprise entre : $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$.

Où : **P** : La précipitation moyenne annuelle, en m.

T : La température moyenne annuelle, en C°.

***Application numérique :**

On a : $\lambda = 0.36$, $1/2\lambda = 1.39$, $1/8\lambda = 0.35$
 $P = 0.3342$ m

La valeur de P n'est pas comprise dans l'intervalle $1/2\lambda, 1/8\lambda$; donc la formule de Contagne n'est pas applicable dans notre cas.

➤ **Méthode de Wundt :**

La valeur de l'ETR est déduite de l'abaque de Wundt (Fig. IV.11), en prenant en considération la température moyenne annuelle (T) et la précipitation annuelle (P).

On obtient donc la valeur 318 mm, soit 95.15 % des précipitations.

➤ **Méthode de Verdeil :**

La valeur de l'ETR est estimée à l'aide de l'abaque de P.Verdeil pour les climats semi-aride (Fig.IV.12), ce qui donne une valeur de l'ordre 320 mm, soit 95.75 % des précipitations.

➤ **Bilan de Thornthwaite :**

Pour établir le bilan hydrique il faut d'abord calculer la RFU qui est la réserve facilement utilisable. Cette RFU est nécessaire pour le bon fonctionnement physiologique des plantes.

Thornthwaite, dans ces calculs utilisait une valeur moyenne de la RFU = 100 mm, en 1954 Hallaire, a proposé une méthode permettant d'améliorer la connaissance de la réserve en eau du sol qui est donnée par la relation suivante :

$$RFU = (C - F / 100) * h * D + 30 \text{ mm. (IV.16)}$$

Où :

RFU : Réserve facilement utilisable en (mm) ;

C : Capacité de rétention aux champs ;

F : Capacité du point de flétrissement des plantes; c'est la limite inférieure de l'eau absorbable par les plantes ;

h : Profondeur du sol en (mm) ;

D : Densité apparente du sol (Hallaire propose de prendre $D = 1$) ;

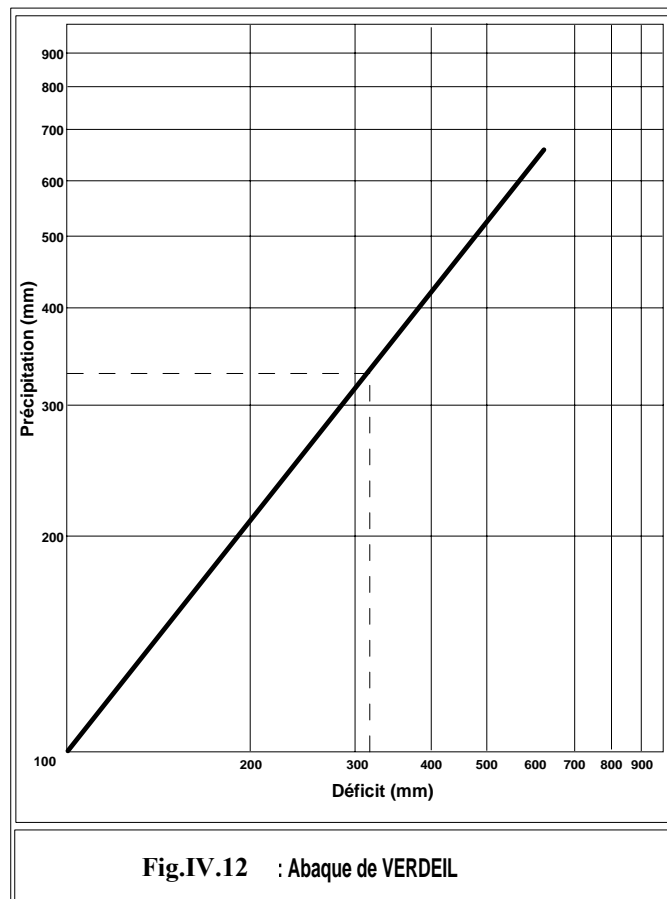
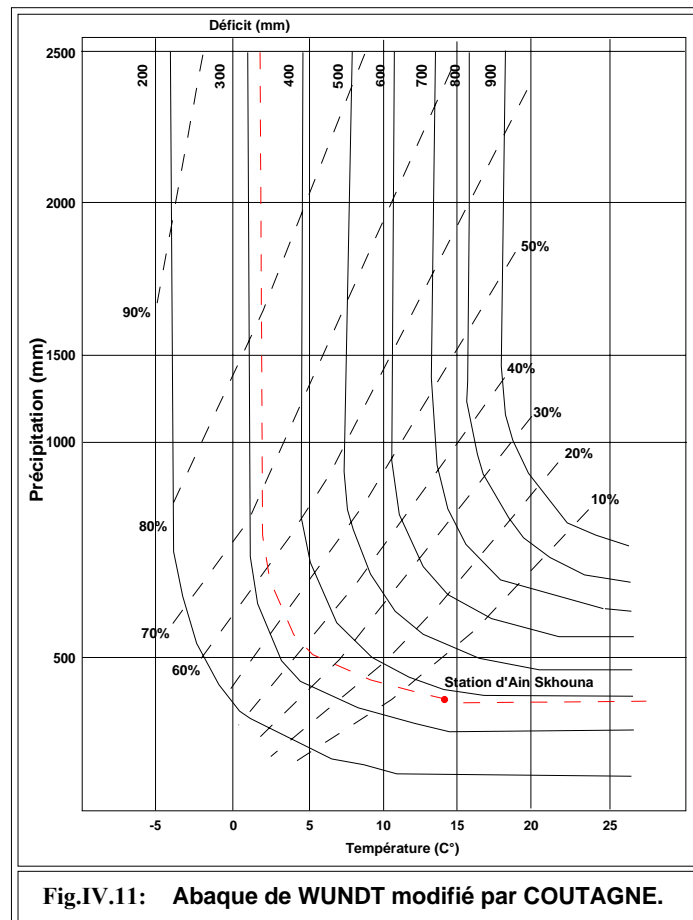
Les 30mm supplémentaires correspondent au déracinement capillaire.

Hallaire propose :

$C - F = 05 \%$ → pour un sol sablo – limoneux ;

$C - F = 10 \%$ → pour un sol limoneux ;

$C - F = 20 \%$ → pour un sol argilo – limoneux ;



Nous avons pris $C - F = 5 \%$ et $h = 300 \text{ mm}$ (profondeur moyenne d'enracinement des cultures de la région d'après le service de pédologie de l'A.N.R.H de Constantine).

La RFU calculée donne une valeur égale à 45 mm . ($RFU_{\min} = 0 \text{ mm}$ et $RFU_{\max} = 45 \text{ mm}$).

A partir des données des pluies mensuelles et l'ETP calculée par la formule de Thornthwaite, plusieurs cas peuvent être envisagés :

- 1- Si : $P > ETP \rightarrow ETR = ETP \rightarrow RFU = P - ETP$.
- 2- Si : $P = ETP \rightarrow$ Les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU $\rightarrow [RFU = 0]$.
- 3- Si : $P < ETP \rightarrow$ il y aura épuisement des réserves, dans ce cas on aura un déficit du bilan ($ETP - ETR$), ou encore ($ETP - P$) qui représentera la quantité d'eau qu'il faudra ajouter à l'ETR pour atteindre l'ETP.

Les résultats de calculs sont mentionnés dans le tableau IV.12 :

- o Si on examine l'évolution de l'ETPc à l'échelle mensuelle, on constate l'existence de deux saisons bien distinctes : l'une pendant laquelle les précipitations sont supérieures à l'ETP (Décembre - Mars) et la seconde on a l'inverse (Avril - Novembre) ;
- o Pendant la saison froide, le bilan hydrique est positif où les précipitations couvrent les besoins de l'ETP et permettent la formation d'une réserve facilement utilisable RFU ;
- o Dès le mois de Mai apparaît un déficit agricole qui montre une période sèche et qui se poursuit jusqu'à l'épuisement de la RFU ;
- o L'ETR est égale à 309.8 mm , soit 92.7% des précipitations.

Tableau IV.12 : Bilan hydrique d'après Thornthwaite à la station d'Ain Skhouna.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total (mm)
P	36.4	26.1	23.7	35.4	29.6	29.7	38.7	25.7	38	19.8	11.9	19.2	334.2
ETPc	96	59	28	14	10	14	26	43	83	122	149	141	785
P-ETPc	-59.6	-32.9	-4.3	21.4	19.6	15.7	12.7	-17.3	-45	-102.2	-137.1	-121.8	/
ETR	36.4	26.1	23.7	14	10	14	26	43	65.7	19.8	11.9	19.2	309.8
RFU	0	0	0	21.4	41	45	45	27.7	0	0	0	0	/
Déficit	59.6	32.9	4.3	0	0	0	0	0	17.3	102.2	137.1	121.8	475.2
Excédent	0	0	0	0	0	11.7	12.7	0	0	0	0	0	24.4

➤ **Discussion des résultats :**

Le tableau (IV.13) récapitule les différentes valeurs de l’ETR, obtenues par les différentes méthodes ainsi que la valeur de l’ETPc obtenue par la méthode de Thornthwaite pour la station d’Ain Skhouna.

Les valeurs de l’ETR trouvées par les différentes méthodes sont relativement proches l’une de l’autre dont celle de Thornthwaite étant un peu inférieure que les autres, ce qui nous a invité à prendre la moyenne de ces quatre valeurs qui est 317mm, soit 94.85 % des précipitations.

L’ETPc est calculée uniquement par la formule de Thornthwaite, elle est de l’ordre 785 mm.

Tableau IV.13 : Valeurs de l’ETP et l’ETR obtenues par différentes méthodes.

Paramètre	Méthode	Résultat en (mm)
ETPc	Thornthwaite	785
ETR	Thornthwaite	309
	Turc	322
	Wundt	318
	Verdeil	320
ETR moyenne		317

IV.4. Bilan hydrologique :

Le bilan hydrologique permet d’évaluer la répartition des précipitations entre les différents composants de ce bilan, à savoir : l’écoulement, l’infiltration et l’évapotranspiration.

Le bilan est établi selon la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \quad (IV.17)$$

Où :

P : La précipitation moyenne annuelle en (mm).

ETR : L’évapotranspiration réelle en (mm).

R : Le ruissellement en (mm).

I : L’infiltration en (mm).

IV.4.1. Ruissellement superficiel :

Il est estimé à partir de la formule de Tixeront-Berkaloff qui est la suivante :

$$R = P^3 / 3(ETPc)^2 \quad (IV.18)$$

On a: $P = 334.2 \text{ mm}$, $ETPc = 785 \text{ mm}$, $R = 20.2 \text{ mm}$

Ce qui représente 6.04 % des précipitations.

IV.4.2. Infiltration :

L'infiltration est le passage de l'eau à travers la surface du sol, il est exprimé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \rightarrow I = P - (ETR + R) \quad (IV.19)$$

Donc $I = 4.2$ mm, ce qui représente 1.25 % des précipitations.

Cette valeur est faible et cela peut être lié à l'évaluation de l'ETR déterminée par la méthode de Thornthwaite où l'échelle mensuelle est critiquable. D'autre part elle est en relation avec la RFU ; en particulier la RFU_{max} qui n'est pas assez précise selon la méthode de Thornthwaite, ou celle de Hallaire. Tenant compte de cela, l'aquifère pourrait être alimenté soit latéralement soit par remontée à partir de l'aquifère profond.

Conclusion :

- Le climat qui règne dans notre région d'étude est semi-aride, il est caractérisé par des hivers froids et pluvieux et des étés chauds et secs.
- Le secteur appartient à une zone peu pluvieuse, avec une précipitation moyenne annuelle de l'ordre 334 mm.
- La température moyenne annuelle est de l'ordre de : 14.24 C°.
- L'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle moyenne sont respectivement de 785 mm, soit 235 % des précipitations et 317 mm, soit 95 % des précipitations.
- Le déficit agricole estimé est de 475.2 mm étalé sur la période allant de Mai jusqu'à Novembre, soit 142 % des précipitations.
- Le ruissellement et l'infiltration représentent respectivement 6 % et 1% des précipitations.

CHAPITRE V

CADRE HYDROGEOLOGIQUE

Introduction :

La détermination des différents aquifères dans la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout, a été faite sur l'analyse litho-stratigraphique et structurale des formations géologiques ainsi que sur les données géophysiques. A partir de cette analyse, le cache hydrogéologique de la plaine permet de constater qu'on a deux aquifères :

- L'un superficiel ; qui est l'aquifère mio-plio-quadernaire.
- L'autre profond ; qui est l'aquifère du Jurassique et du Crétacé.

Nous essayons de voir dans ce qui suit les caractéristiques de ces deux grands ensembles.

V.1. Aquifère superficiel d'âge Mio-Plio-Quadernaire :**V.1.1. Description des formations aquifères :**

C'est un aquifère hétérogène constitué essentiellement par des calcaires lacustres, des conglomérats et des alluvions. Les formations occupent presque tout le terrain d'étude à l'exception des reliefs.

V.1.2. Alimentation :

L'alimentation de cette nappe se fait directement par les précipitations sur la plaine et par les écoulements des glacis qui nappent les reliefs, par les apports des crues occasionnelles et enfin par l'aquifère profond au niveau des failles. La nappe peut être affleurante dans l'axe de dépression du chott Gadaïne.

V.1.3. Exutoire :

Son exutoire naturel est le chott Tinsilt se trouvant à la cote 788m.

V.1.4. Conditions aux limites :

En dehors des infiltrations directes des eaux des précipitations, la nappe superficielle reçoit toutes les eaux qui dévalent les flancs internes des massifs carbonatés qui sont :

- Dj Guedmane au Nord.
- Dj Sarif et Taфраout au Sud.
- Les monts d'Ain Yaghout et Dj Tarbennt à l'Est.
- Dj Merzeguène et Tizourit à l'Ouest.

Ces massifs constituent une limite à flux imposé entrant.

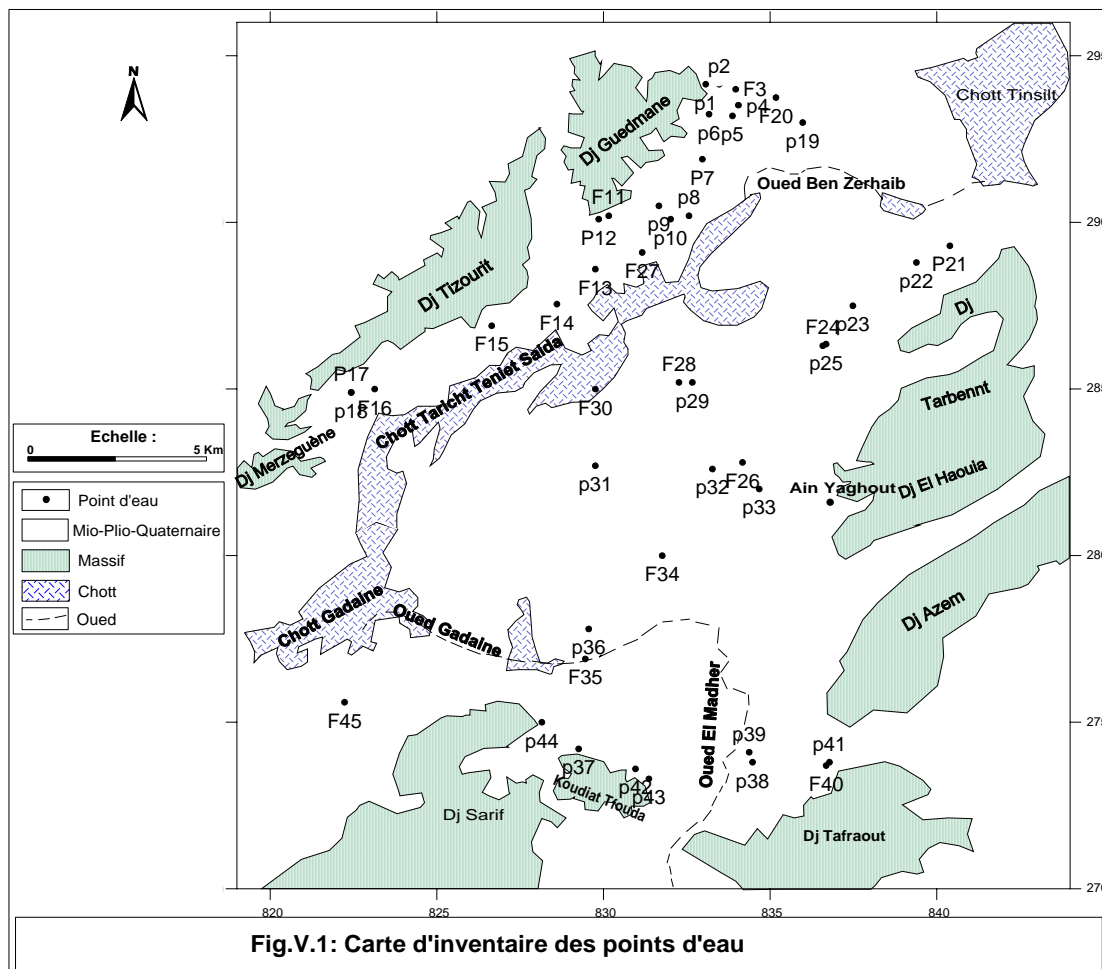
Au Sud, au niveau du seuil alluvionnaire enserré entre Koudiat Tfouda et Dj Tafraout, on a une alimentation par les eaux de surface d'oued El Madher, donc c'est une limite à flux imposé entrant aussi. Les limites Nord Est et Sud Ouest sont occupées par chott Tinsilt et chott Gadaïne, ce sont des limites à flux imposé.

Le substratum de cet aquifère correspond aux formations marneuses et argileuses dans quelques endroits, et considéré comme les formations calcareuses du Crétacé et du Jurassique dans la majorité de la surface de la plaine, donc une alimentation souterraine est très probable.

V.1.5. Etude piézométrique :

V.1.5.1. Inventaire des points d'eau :

Notre zone d'étude présente un certain nombre de puits et de forages qui sont dispersés dans la plaine et qui sont destinés à l'alimentation en eau potable, à l'irrigation et aux autres usages domestiques. Afin de réaliser cette étude, nous avons sélectionné 45 points d'eau exploitant le complexe aquifère superficiel pour les deux campagnes piézométriques effectuées en Mai et Septembre 2009 (Fig.V.1).



V.1.5.2. Interprétation des cartes piézométriques :

La carte piézométrique à une date donnée est la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques, ainsi que des conditions aux limites hydrodynamiques.

Les deux campagnes de relevé piézométrique vont nous permettre de faire une analyse de la piézométrie de la nappe du Mio-Plio-Quaternaire et de tracer les cartes piézométriques qui nous amènent à dégager le sens d'écoulement des eaux souterraines, les principales zones d'alimentation et de drainage et de calculer le gradient hydraulique à différents endroits.

➤ La carte piézométrique de la campagne de Mai 2009 (Fig.V.2) montre que l'organisation générale des écoulements est orientée du SE vers le NW à l'Est de la plaine et du NW vers le SE à l'Ouest. Ces écoulements convergent vers la zone de drainage du chott Gadaïne et chott Tinsilt.

La carte piézométrique de la campagne de Septembre 2009 (Fig.V.3) montre une organisation de l'écoulement identique à celle de Mai 2009.

La comparaison entre la carte piézométrique de Mai 2009 et celle de Septembre 2009 montre que le niveau piézométrique de cette dernière s'est abaissé progressivement depuis chott Gadaïne (par 1 m) vers les monts d'Ain Yaghout (par 2 m).

La comparaison de la carte piézométrique de Mai 2009 avec celle établie en Juin 2001 (dans une étude antérieure dans la même plaine) montre que le niveau piézométrique enregistré pendant la campagne de Mai 2009 augmente à proximité du chott Gadaïne (par 1 m), au centre de la plaine (environ de 0.5 m) et vers les monts d'Ain Yaghout (par 12 m). Dans la partie NW de la plaine le relèvement de la nappe atteint 4 m.

➤ Calcul du gradient hydraulique :

L'écartement des courbes piézométriques est fonction du gradient hydraulique, qui est d'autant plus fort que les courbes sont plus serrées, c'est notamment le cas à la limite NW de la plaine (10^{-2}). Il a été évalué à (5.10^{-3}) dans la partie centrale de la plaine où les courbes isopièzes présentent un espacement un peu large.

Ce gradient est directement lié à la perméabilité du milieu, à la vitesse d'écoulement et au débit.

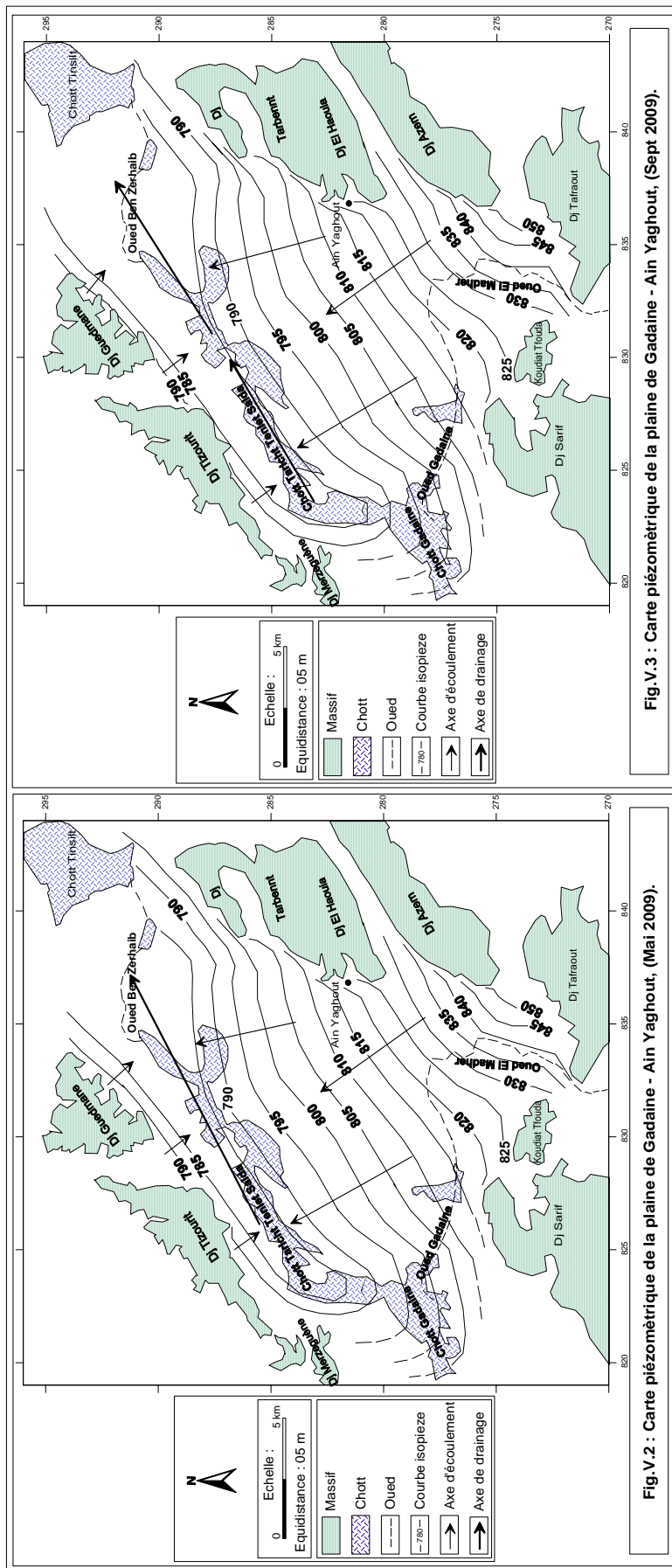
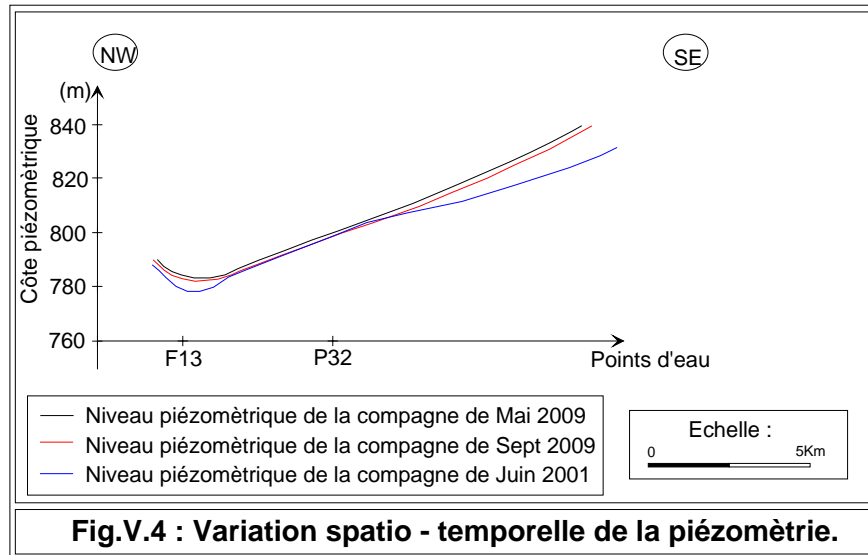


Fig.V.3 : Carte piézométrique de la plaine de Gadaine - Ain Yaghout, (Sept 2009).

Fig.V.2 : Carte piézométrique de la plaine de Gadaine - Ain Yaghout, (Mai 2009).



V.2. Complexe aquifère profond :

V.2.1. Description des formations aquifères :

Il est constitué par deux types de formations :

V.2.1.1. Formations du Crétacé :

Ces formations sont de nature carbonatée, affleurent en bordures de la plaine formant les reliefs sous forme des massifs tels que : Dj Tizourit, Dj Taфраout et les monts d'Ain Yaghout. Ces formations plongent sous une grande épaisseur des formations du recouvrement mio-plio-quadernaire.

V.2.1.2. Formations du Jurassique :

Son toit est marneux avec parfois des argiles et des galets calcaires à Dj Merzeguène, entre autre.

V.2.2. Alimentation :

Les plus importantes zones d'alimentation se situent dans les massifs ainsi que sur les piémonts qui sont recouverts d'une faible couche d'alluvions ou dans la plaine quand il n'y a pas d'écran imperméable séparant l'aquifère superficiel ce qui permet l'infiltration des eaux météoriques.

L'alimentation se fait également par l'intermédiaire d'un réseau de fractures acheminant de grandes quantités d'eau.

V.2.3. Sorties :

Les exutoires naturels des aquifères karstiques sont les sources. Elles sont nombreuses aux piémonts des massifs, dont la plus importante est celle d'Ain Yaghout avec un débit de 25 l/s ; elle coule à la faveur de la zone des fractures qui limite les monts d'Ain Yaghout.

De très nombreux forages exploitent l'aquifère profond par pompage (voir annexe I). Les plus importants sont situés près des bordures, comme le cas du forage Gadaïne – Taklilt (G1) et le forage Gadaïne (G2) situés à proximités du Dj Merzeguène, ayant des profondeurs respectives de 250 m et 294 m.

Ils atteignent les formations des calcaires dolomitiques du Crétacé inférieur (pour G2) et du Jurassique (pour G1), avec un débit respectif de l'ordre de 80 l/s et 73 l/s. Au centre de la plaine, on rencontre le forage de Henchir Cedra (H1) qui a une profondeur de 404 m. Il exploite la nappe profonde des calcaires du Crétacé inférieur avec un débit de 23 l/s.

Ces forages sont destinés à l'alimentation en eau potable des agglomérations limitrophes.

V.2.4. Bilan hydrogéologique :

Pour l'établissement du bilan hydrogéologique, nous avons pris en considération les paramètres suivants :

- Les entrées :
 - Les apports latéraux à partir des affleurements des calcaires ;
 - L'infiltration des eaux météoriques;
- Les sorties :
 - Les prélèvements par pompage ;
 - Les sources.

Pour l'aquifère en question, les débits prélevés par forage et ceux qui sortent par l'intermédiaire des sources, destinés à l'AEP, sont de l'ordre de 201 l/s.

Un tel calcul a permis d'aboutir à un bilan positif (Tableau.V.1). Le stockage dans l'aquifère est de l'ordre de 1.4 hm³/an, ce qui explique le relèvement continu du niveau piézométrique de cet aquifère.

Tableau.V.1 : Le bilan hydrogéologique.

Entrées (hm ³ /an)			Sorties (hm ³ /an)	Stockage (hm ³ /an)
Infiltration	Apports latéraux	Total		
1.7	6	7.7	6.3	1.4

V.2.5. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe :

La détermination des caractéristiques hydrauliques des aquifères se fait par des pompages d'essais. Cette méthode consiste à représenter expérimentalement par des graphiques, les courbes et les droites des fonctions mathématiques régissant l'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage.

L'étude de ces graphiques permet :

- D'analyser l'évolution du cône de dépression de la surface piézométrique ;
- De préciser les principales caractéristiques hydrauliques de la nappe ;
- De voir en temps réel l'effet de l'exploitation de l'aquifère.

La conduite des essais de débit et leur interprétation repose sur le régime d'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage. C'est pourquoi, il est recommandé d'être prudent sur le choix des formules à appliquer et de leurs conditions limites.

V.2.5.1. Expérimentations des pompages d'essais:

- **Essais de puits :** Cet essai consiste en l'exécution de pompage par palier de débit de courte durée avec la mesure du niveau d'eau dans le puits. Cet essai permet de déterminer les caractéristiques du complexe : aquifère / ouvrage de captage. La manière la plus rentable sans très solliciter la nappe, est de n'extraire que la réserve régulatrice afin d'éviter une surexploitation minière de la ressource. Cela n'est possible que si le débit d'exploitation est inférieur au débit critique en respectant le nombre d'heure de pompage par jour.
- **Essais de nappe :** Cet essai est réalisé en un seul palier de débit de longue durée, avec la mesure des niveaux d'eau dans le puits (rabattement) et dans des piézomètres si c'est possible. Ce type d'essai est utilisé dans le but de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (Transmissivité, Coefficient d'emménagement...). Il faut noter que l'interprétation n'est possible que si le type d'aquifère est identifié.

V.2.5.2. Interprétation des pompages d'essais :

L'interprétation des pompages d'essais repose sur des méthodes graphiques d'approximation. Ces méthodes sont toutes basées sur les hypothèses suivantes :

1. Le débit est supposé constant pendant toute la durée de pompage ;
2. La surface de la nappe est supposée horizontale ;
3. Le puits ou le forage captent la nappe sur la totalité de son épaisseur ;
4. L'écoulement est supposé laminaire ;
5. L'aquifère est illimité.

L'exécution et l'interprétation des données brutes (rabattements et temps, voir annexe II), reposent sur l'emploi des expressions d'hydrodynamiques en régime transitoire, établies par Theis (1935) et ses successeurs Wenzel (1942) et Jacob (1950).

Jacob (1905) a établi une expression logarithmique utilisable lorsque le temps de pompage croît et quand le rabattement décroît, cette formule est la suivante :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad (\text{V.1})$$

Avec :

Δ : Rabattement observé à l'instant $\langle t \rangle$ dans le puits d'observation en mètre;

Q : Débit de pompage constant dans le puits en m^3/s ;

T : Transmissivité de l'aquifère en m^2/s ;

t : Durée de pompage (le temps écoulé à un instant donné depuis le début du pompage, en secondes) ;

S : Coefficient d'emmagasinement (sans dimension) ;

r : Distance du sondage d'observation à l'axe du puits de pompage en mètre.

Les rabattements sont obtenus, à 5%, pour $t > 10r^2S/4T$.

Cette expression est la plus utilisée, elle comporte deux parties :

➤ **Partie - 1 - lors de la descente :**

○ **Calcul de la transmissivité :**

Soit l'équation de Jacob lors de la descente :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2S} \quad (\text{V.2})$$

Après développement, on obtient l'expression (V.3) :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log t + \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25T}{r^2S} \quad (\text{V.3})$$

C'est l'équation d'une droite de la forme : $y = ax + b$, avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} y = \Delta \\ x = \log t \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} a = \frac{0,183Q}{T} \\ b = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25T}{r^2S} \end{array}$$

On reporte sur un papier semi-logarithmique les valeurs mesurées sur le terrain, en abscisses les logs des temps et en ordonnées les rabattements correspondant [$\Delta = f(\log t)$].

La transmissivité est calculée par la pente de la droite représentative qui est déterminée par l'accroissement des rabattements, à l'aide d'un module logarithmique, noté «a» ou «C ». La transmissivité est calculée par l'expression (V.4):

$$T = \frac{0,183Q}{a} \quad (\text{V.4})$$

○ **Calcul du coefficient d'emmagasinement :**

Le coefficient d'emmagasinement est obtenu par calcul numérique dans le deuxième terme de l'expression de Jacob. Ou, plus simplement, avec t_0 , lorsqu'il peut être déterminé, par l'expression (V.5):

$$S = 2.25Tt_0 / r^2. \quad (\text{V.5})$$

Il faut noter que ce paramètre ne peut être calculer correctement que si on a des mesures au niveau d'un piézomètre ce qui n'est pas le cas pour les présents essais.

➤ **Partie - 2 - lors de la remontée :**

On utilise l'expression suivante :

$$\Delta_r = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{t+t'}{t'} \quad (\text{V.6})$$

Avec :

A_r : Rabattement résiduel mesuré à un instant donné pendant la remontée, en mètre ;

t : Temps écoulé depuis le début du pompage, en secondes ;

t' : Temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (temps de remontée).

➤ **Interprétation des données du pompage d'essai de longue durée (Forage d'Ain Yaghout centre) :**

Ce forage est implanté dans la partie centrale de la plaine aux coordonnées Lambert (X= 836 Km, Y= 282 Km) de 117 m de profondeur (Annexe I). Il exploite l'aquifère profond. L'essai qui a été réalisé par la D.H.W de Batna a duré 72 heures pour la descente et avec un débit constant de 60 l/s, (Annexe II).

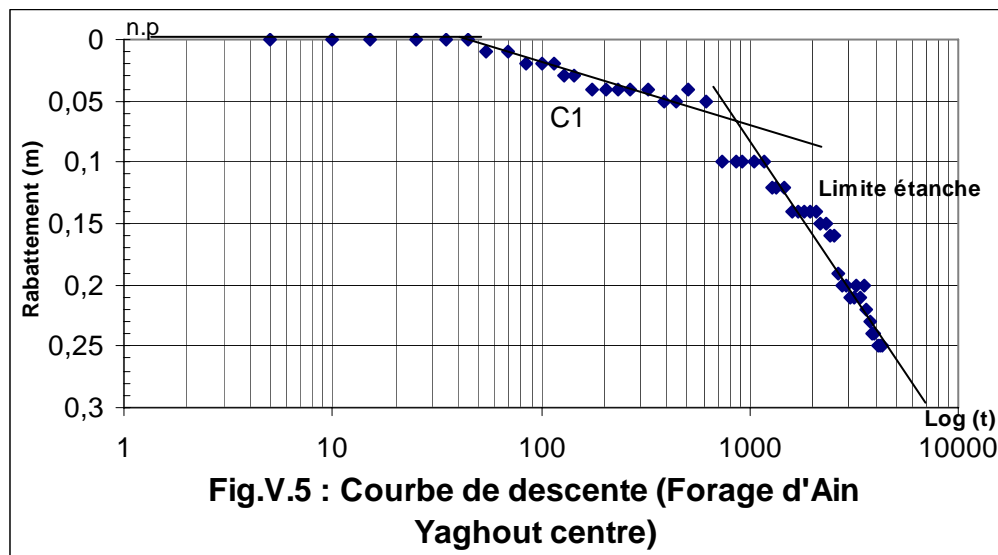
Le graphe (Fig.V.5) représente deux droites avec deux pentes différentes, ce qui confirme l'hypothèse d'un aquifère limité latéralement par une structure étanche.

Pour le reste des forages nous n'avons pas pu avoir les données.

○ **La courbe de descente :**

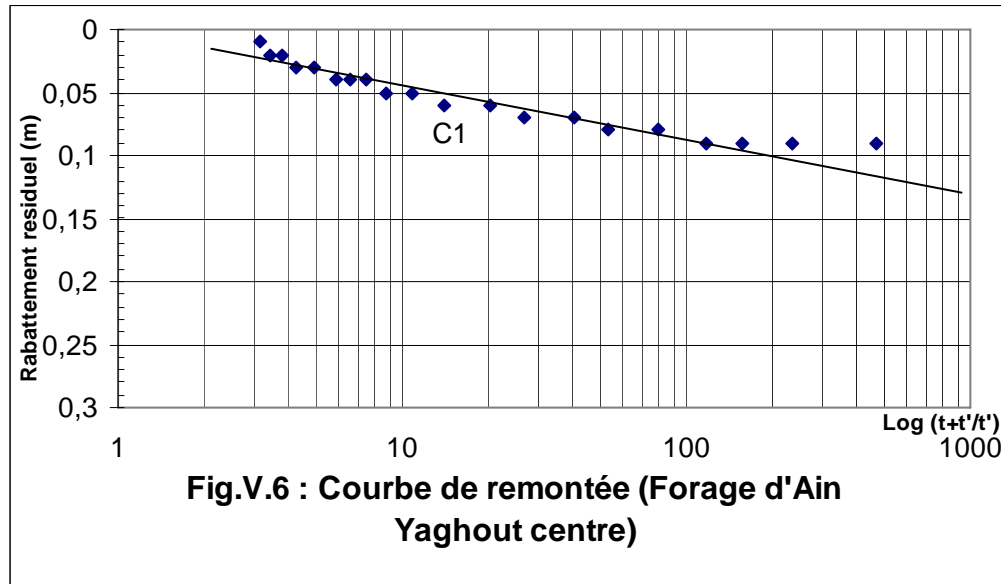
On peut calculer la transmissivité d'après la pente de la première droite qui est déterminée par l'accroissement de rabattement sur le module logarithmique noté « C₁ », (Fig.V.5) :

$$C_1 = 0,05 \text{ et } T_d = 2,2 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}.$$



○ **La courbe de remontée :**

La droite représentative (Fig.V.6) qui permet de calculer la transmissivité a pour pente : $C_1 = 0,04$ et $T_r = 2,7 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$.



❖ Donc, la transmissivité moyenne : $T_{\text{moy}} = \frac{Td + Tr}{2} = 2,4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$.

Conclusion :

- L'ensemble du système aquifère de Gadaïne –Ain Yaghout est constitué de deux aquifères, l'un superficiel d'âge Mio-Plio-Quaternaire, et l'autre profond carbonaté d'âge Jurassico-Crétacé.
- D'après les cartes piézométriques synthétiques de notre zone d'étude, nous concluons que :
 - ◇ L'écoulement souterrain a un aspect qui converge vers chott Gadaïne où par la suite les eaux sont drainées vers chott Tinsilt.
 - ◇ Les valeurs du gradient hydraulique sont variables de $(5 \cdot 10^{-3})$ à la limite NW de la plaine et de (10^{-2}) dans la partie centrale de la plaine.
 - ◇ Les chotts (Tinsilt, Taricht Teniet Saïda,...) représentent le niveau le plus bas de la nappe superficielle.
- Le bilan hydrogéologique montre que le stockage est de l'ordre de $1.4 \text{ hm}^3/\text{an}$, ce qui explique le relèvement continu du niveau piézométrique de l'aquifère profond.
- Le pompage d'essai, nous a permis d'estimer la transmissivité moyenne pour l'aquifère profond qui est de l'ordre de $2,4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Enfin, les deux réservoirs (de Mio-Plio-Quaternaire et de Jurassico-Crétacé) se trouvent en contact dans plusieurs zones ce qui donne la possibilité à l'eau de passer d'un aquifère à l'autre donc un drainage.

CHAPITRE VI

CADRE HYDROCHIMIQUE

Introduction :

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques d'échantillons d'eau que nous avons prélevé au niveau de l'aquifère mio-plio-quadernaire de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout. Nous avons sélectionné vingt cinq points d'eau (dont 12 puits et 13 forages) pour les deux campagnes de 2009 réparties sur l'ensemble du secteur d'étude. Ce choix a été justifié d'une part par leur répartition spatiale et d'autre part, par l'importance des formations hydrogéologiques.

L'étude hydrochimique a porté sur l'analyse et l'interprétation de deux campagnes hydrochimiques (Mai 2009 et Septembre 2009) dont les éléments dosés ont porté essentiellement sur les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , et HCO_3^-).

Le but de ce chapitre est de définir les faciès chimiques des eaux souterraines, de les comparer et de suivre leur évolution dans l'espace et dans le temps. Il sera également étudié la qualité des eaux souterraines vis-à-vis la potabilité et leur aptitude à l'irrigation. Le degré de pollution de ces eaux par les nutriments et par les métaux lourds (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Fe^{2+} , Zn^{2+} et Cu^{2+}) est également abordé. Pour cela, un certain nombre de cartes et de diagrammes ont été élaborés et qui serviront de base pour l'interprétation générale des résultats d'analyses chimiques.

VI.1. Etude des paramètres physiques et l'oxygène dissous :**VI.1.1. Température :**

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz et par conséquent sur la conductibilité. Elle permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface, donc sur son origine. La quasi-totalité des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout présentent une température qui varie entre 14°C et 24°C, ces températures ne dépassent pas les normes fixées par l'O.M.S (25°C).

Cette variation thermique des eaux souterraines peut être fonction de la profondeur de l'aquifère :

- Si l'aquifère est très profond, les eaux ne sont influencées que par le gradient géothermique, elles ne présentent pas donc une grande variation de température;
- Si l'aquifère est peu ou pas profond comme dans notre cas, la température des eaux sera influencée essentiellement par les variations climatiques.

VI.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH de l'eau est défini selon sa concentration en ions H^+ contenus dans la solution. Il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu et renseigne sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau.

VI.1.2.1. Alcalinité ou acidité des eaux :

La concentration des ions (H^+) est exprimée par le logarithme décimal de l'inverse de cette concentration : $pH = \text{Log} \left[\frac{1}{H^+} \right]$. (VI.1)

L'échelle du pH varie de 0 à 14 :

- Pour un milieu neutre ($H^+ = OH^-$) ou $pH = 7$;
- Pour un milieu acide ($H^+ > OH^-$) ou $pH < 7$;
- Pour un milieu basique ($H^+ < OH^-$) ou $7 < pH < 14$.

Le pH mesuré sur terrain au niveau des forages et des puits pendant les deux campagnes varie entre 6.74 et 7.98. Les cartes de répartition du pH (Fig.VI.1 et VI.2) montrent une diminution légère des concentrations de l'Est de la plaine (où les massifs de calcaire) vers les chotts (où la présence des formations salifères).

VI.1.2.2. Equilibres calco-carboniques :

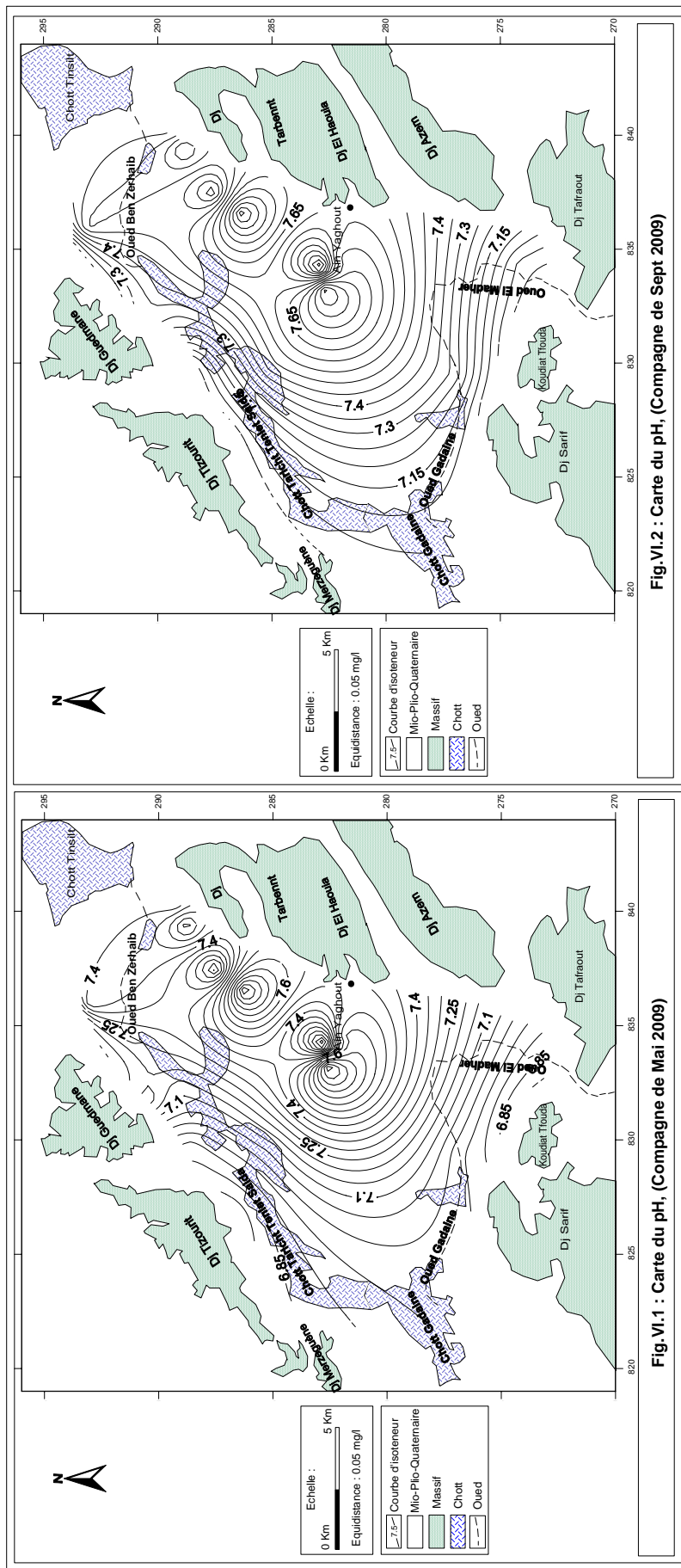
On peut avoir une idée sur l'état d'équilibre de l'eau en comparant le pH d'équilibre au pH mesuré. Le pH d'équilibre est obtenu graphiquement à partir du diagramme de Schoeller - Berkaloff :

- Si le $pH_{\text{mesuré}} > pH_{\text{équilibre}}$ \longrightarrow l'eau est incrustante.
- Si le $pH_{\text{mesuré}} < pH_{\text{équilibre}}$ \longrightarrow l'eau est agressive.
- Si le $pH_{\text{mesuré}} = pH_{\text{équilibre}}$ \longrightarrow l'eau est neutre ou en équilibre.

L'examen du tableau VI.1 montre que la majorité des points d'eau pendant les deux campagnes sont caractérisés par une eau incrustante.

Tableau VI.1 : L'agressivité ou l'incrustante de l'eau.

pH	Pourcentage des points d'eau	
	Mai 2009	Septembre 2009
$pH_{\text{mesuré}} = pH_{\text{équilibre}}$	4	4
$pH_{\text{mesuré}} > pH_{\text{équilibre}}$	64	72
$pH_{\text{mesuré}} < pH_{\text{équilibre}}$	32	24



VI.1.3. Conductivité électrique :

La conductivité électrique d'une eau caractérise sa faculté à laisser passer le courant électrique, elle augmente avec la concentration des ions en solution et la température. Elle correspond à la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface, séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est exprimée en $\mu\text{S} / \text{cm}$. Généralement les valeurs sont ramenées à 25° C.

La conductivité, ou son inverse la résistivité, permet donc une estimation de la minéralisation des eaux. On sait qu'une eau salée est très conductrice, par contre une eau pure est très résistante.

Le tableau VI.2 montre que la majorité des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout, pendant les deux campagnes, ont une forte conductivité, donc un degré de minéralisation élevé. Les valeurs de conductivité de ces eaux restent supérieures aux limites des normes de potabilité fixées par l'OMS ($\sigma < 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$).

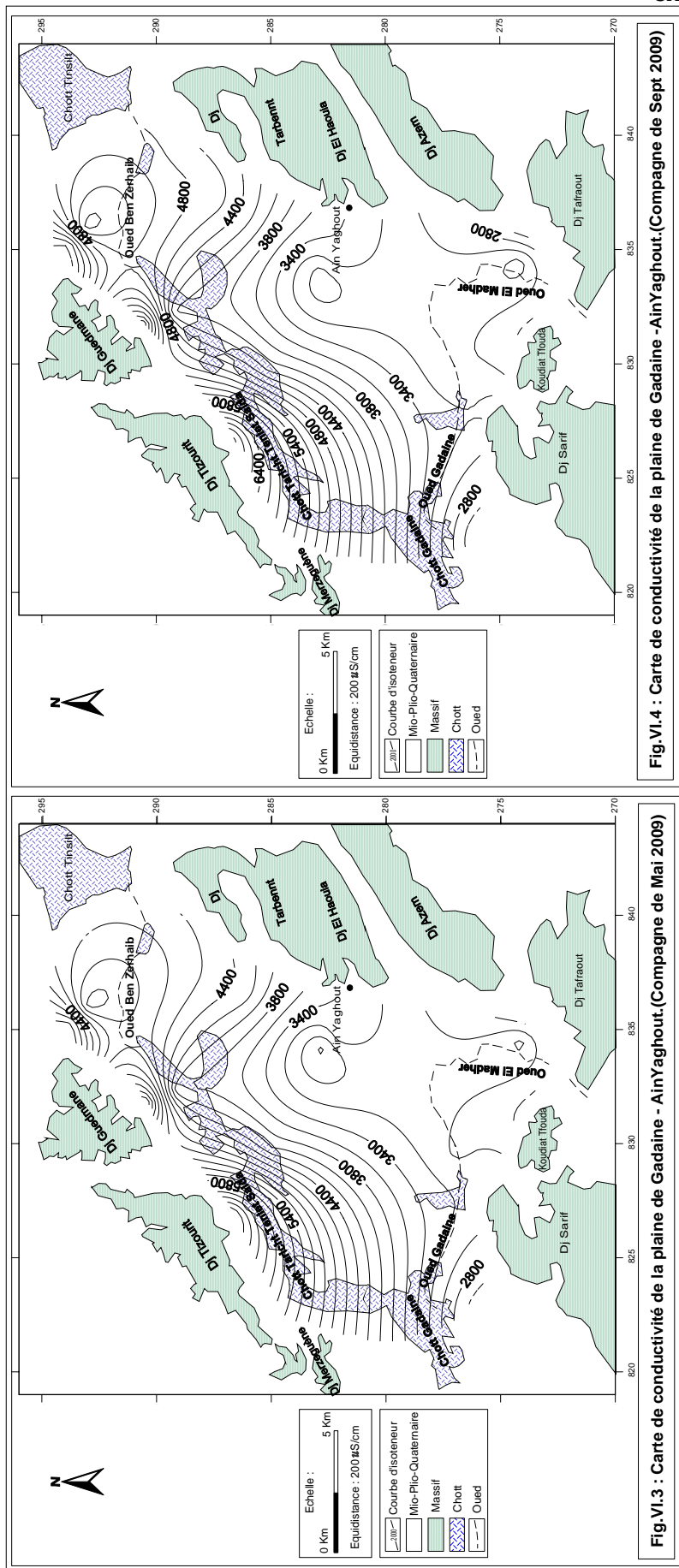
Tableau VI.2: Classification des eaux souterraines en fonction de la conductivité.

Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) à 25 °C	Degré de minéralisation	Pourcentage des points d'eau	
		Mai 2009	Sept 2009
< 45	Très faible	/	/
450 - 750	Faible	/	/
750 - 1500	Moyen	/	/
1500 - 2300	Moyennement élevé	8	8
2300 - 3000	Elevé	12	16
> 3000	Très élevé	80	76

VI.1.3.1. Cartes de la conductivité électrique:

La conductivité des eaux souterraines de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout varie entre 1941 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 7260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pendant la campagne de Mai 2009 (Fig.VI.3) et entre 1980 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 7310 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pendant la campagne de Sept 2009 (Fig.VI.4). Ces deux cartes montrent que la conductivité augmente dans le sens d'écoulement des eaux souterraines. Ceci est lié à plusieurs facteurs tels que :

- Le lessivage des formations traversées et en particulier les terrains triasiques;
- L'évaporation : lorsque le niveau piézométrique est proche de la surface du sol.



VI.1.4. L'oxygène dissous :

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

Les cartes (Fig.VI.5 et VI.6) montrent que les teneurs en oxygène dissous diminuent au fur et à mesure lorsqu'on rapproche aux chotts. Cela peut être dû au phénomène d'eutrophisation qui est la modification et la dégradation d'un milieu aquatique, lié en général à un apport excessif de substances nutritives notamment le phosphore et l'azote, qui augmentent la production d'algues et de plantes aquatiques. La décomposition et la minéralisation de ces algues, consomment de l'oxygène dissous, autrement dit, plus il y a d'algues, moins il y a d'oxygène.

VI.2. Les faciès chimiques :

VI.2.1. Formule caractéristique de STABLER :

La formule caractéristique (VI.2) selon STABLER consiste à calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale.

$$r\% = \left(\frac{100}{c}\right) * r \quad \text{(VI.2)}$$

Avec : r : est la quantité en réaction de l'ion considéré en méq/l ;

c : la concentration totale.

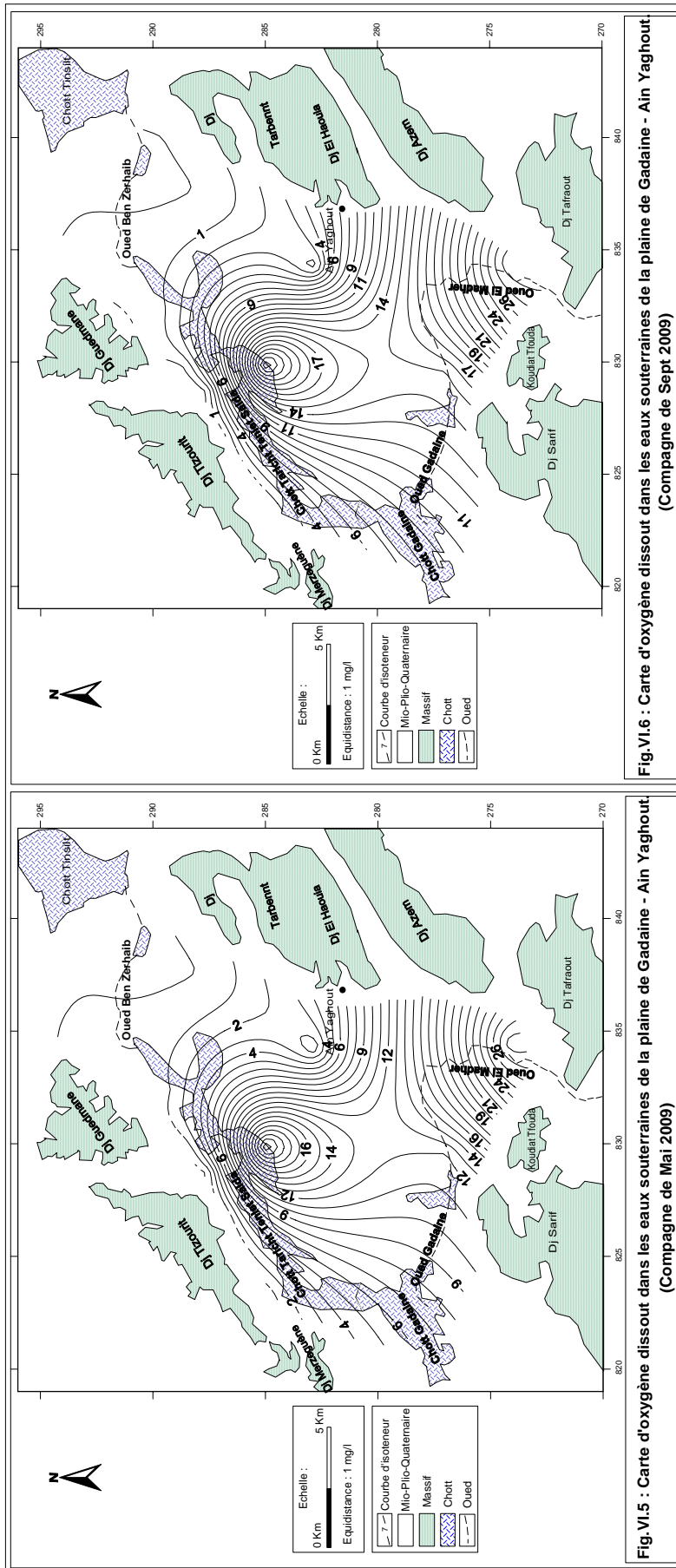
On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant (voir annexe III). Les résultats obtenus permettent de distinguer les faciès qui figurent dans le tableau VI.3.

L'examen du tableau VI.3 montre que les eaux des deux compagnes sont des eaux chlorurées et sulfatées.

Ces familles représentent respectivement 92 % et 8 % des points d'eau. La prédominance de ces deux familles est due à la présence des évaporites qui sont riches en chlorures et en sulfates.

Tableau VI.3 : Classification des eaux souterraines des deux compagnes selon STABLER.

Compagne Chimique	Famille des eaux	Faciès chimique	Pourcentage	
Mai 2009	Chlorurée	Chloruré sodique	40	92
		Chloruré calcique	40	
		Chloruré magnésien	12	
	Sulfatée	Sulfaté sodique	4	8
		Sulfaté magnésien	4	
Sept 2009	Chlorurée	Chloruré sodique	40	92
		Chloruré calcique	44	
		Chloruré magnésien	8	
	Sulfatée	Sulfaté sodique	4	8
		Sulfaté magnésien	4	



VI.2.2. Diagramme de PIPER :

La présentation des analyses chimiques des différentes compagnes sur ce type de diagramme (Fig.VI.7) permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines. Le tableau VI.4 montre que les eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout pour les deux compagnes présentent deux familles dominantes qui sont :

- ❖ Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.
- ❖ Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique.

Tableau VI.4 : Classification des eaux souterraines des deux compagnes selon PIPER.

Compagne chimique	Famille des eaux	Pourcentage
Mai 2009	Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne	40
	Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique	60
Sept 2009	Chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne	44
	Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique	56

VI.2.3. Diagramme de SCHOELLER – BERKALOFF :

Le diagramme a été établi par H. SCHOELLER en 1932, et révisé par BERKALOFF en 1952, il est composé de sept échelles logarithmiques verticales correspondant aux principaux ions analysés dans l'eau.

Les diagrammes logarithmiques (Fig.VI.8 et VI.9) ont permis d'identifier les grandes familles chimiques qui sont mentionnées dans le tableau VI.5.

Tableau VI.5 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de SCHOELLER- BERKALOFF.

Compagne chimique	Faciès chimique		Pourcentage	
Mai 2009	Famille des eaux chlorurées	Chlorurée sodique	68	92
		Chlorurée magnésienne	24	
	Famille des eaux sulfatées	Sulfatée sodique	4	8
		Sulfatée magnésienne	4	
Sept 2009	Famille des eaux chlorurées	Chlorurée sodique	72	92
		Chlorurée magnésienne	20	
	Famille des eaux sulfatées	Sulfatée sodique	4	8
		Sulfatée magnésienne	4	

A première vue, on remarque une dominance des chlorures ou des sulfates qui semblent être liées à la géologie ou à l'évaporation. Ces deux éléments accompagnent tantôt le sodium, tantôt le magnésium.

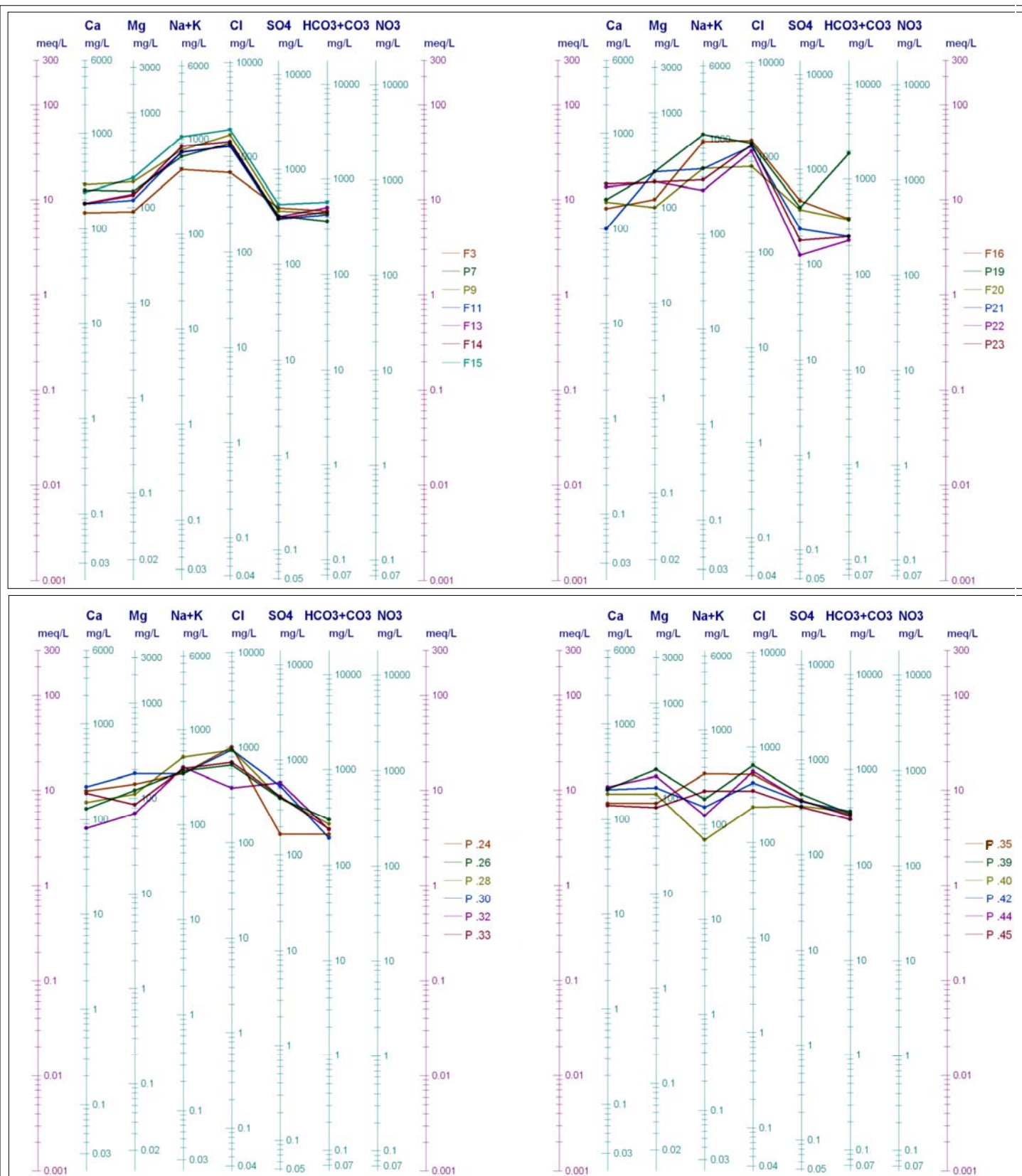


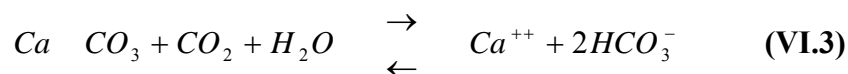
Fig.VI.9 : Représentation graphique des analyses d'eau de la plaine Gadaine - Ain Yaghout à l'aide du diagramme de SCHOELLER - BERKALOFF, (Compagne de Sept 2009)

VI.3. Cartographie hydrochimique :

L'établissement des cartes d'isoteneurs en ion permet d'apprécier la répartition des concentrations et d'expliquer leur origine. Pour cela nous avons dressé des cartes d'isoteneurs en Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , SO_4^{-} , Cl^- et HCO_3^- . La forme des courbes est quasiment identique pour les deux campagnes :

VI.3.1. Cartes du calcium :

Cet élément est fréquent dans les roches sédimentaires, il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($Ca SO_4, 2H_2O$), qui sont facilement solubles selon l'équation (VI.3) :



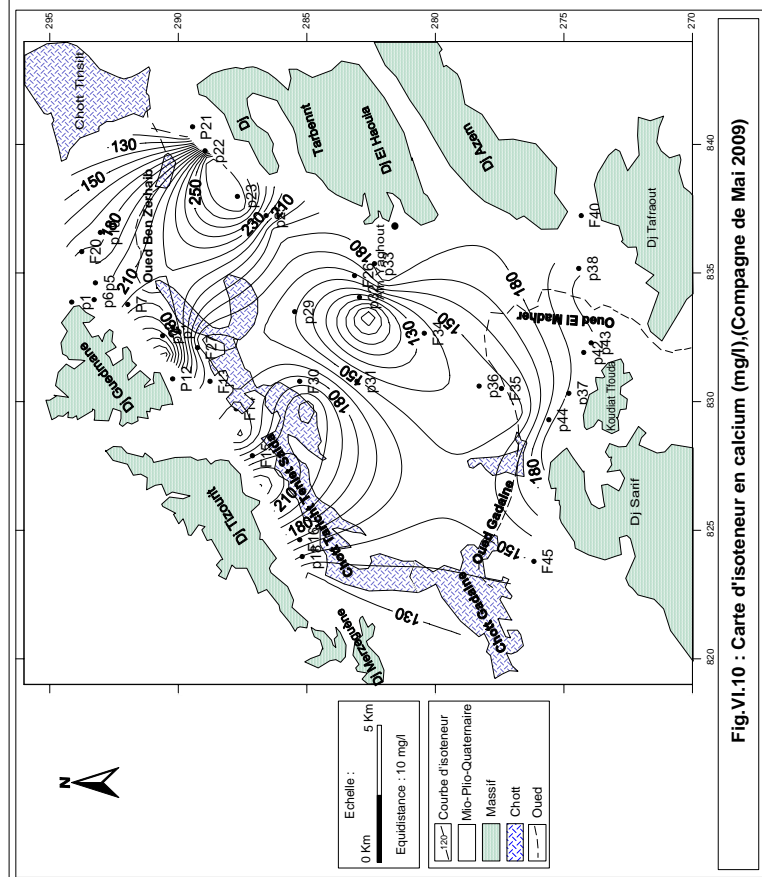
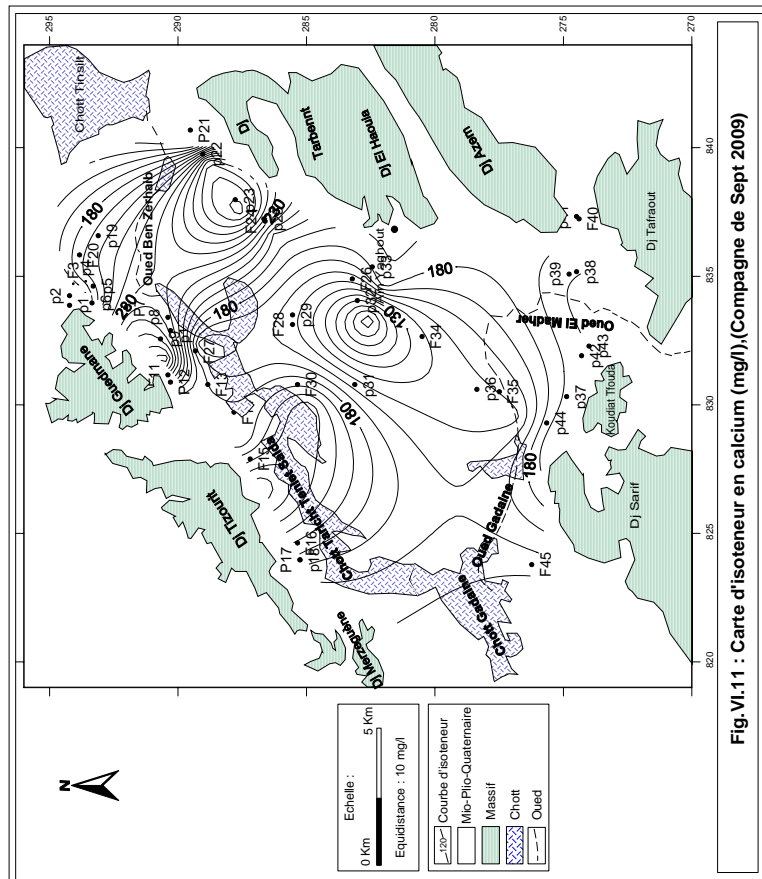
Pour la campagne de Mai 2009, les teneurs de calcium varient entre 79 mg/l au puits 32 situé au centre de la plaine et 279 mg/l au puits 22 localisé au voisinage de Dj Tarbennt. Pour la campagne de Sept 2009, ces teneurs varient entre 80 mg/l au puits 32 et 295 mg/l au puits 23. L'examen des cartes (Fig.VI.10 et VI.11) montre que les concentrations diminuent progressivement à partir des massifs carbonatés, qui sont l'origine de cet élément, vers le centre de la plaine.

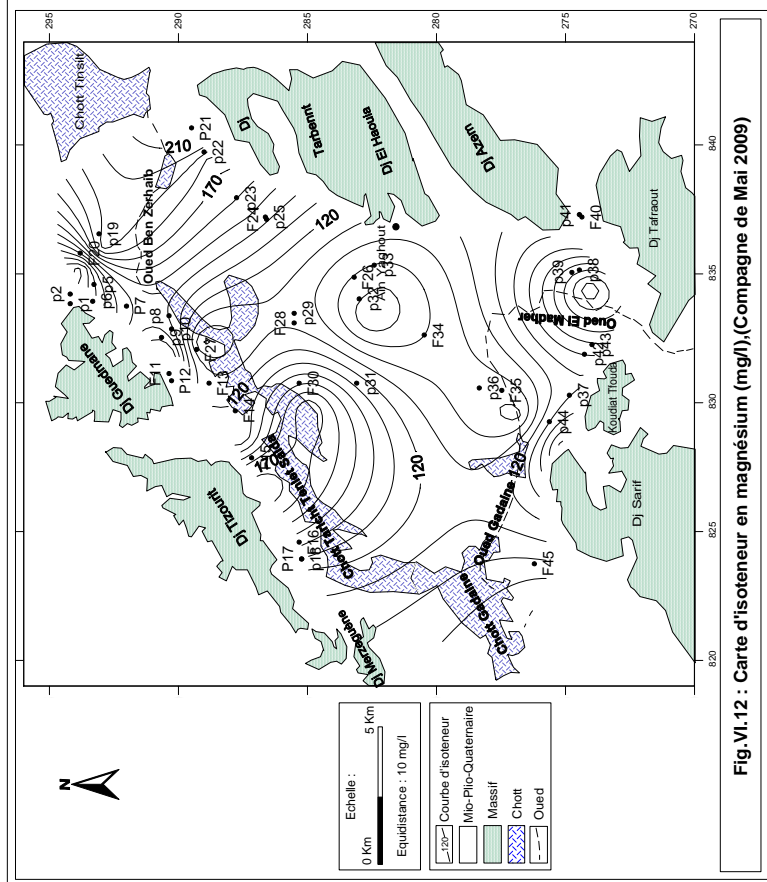
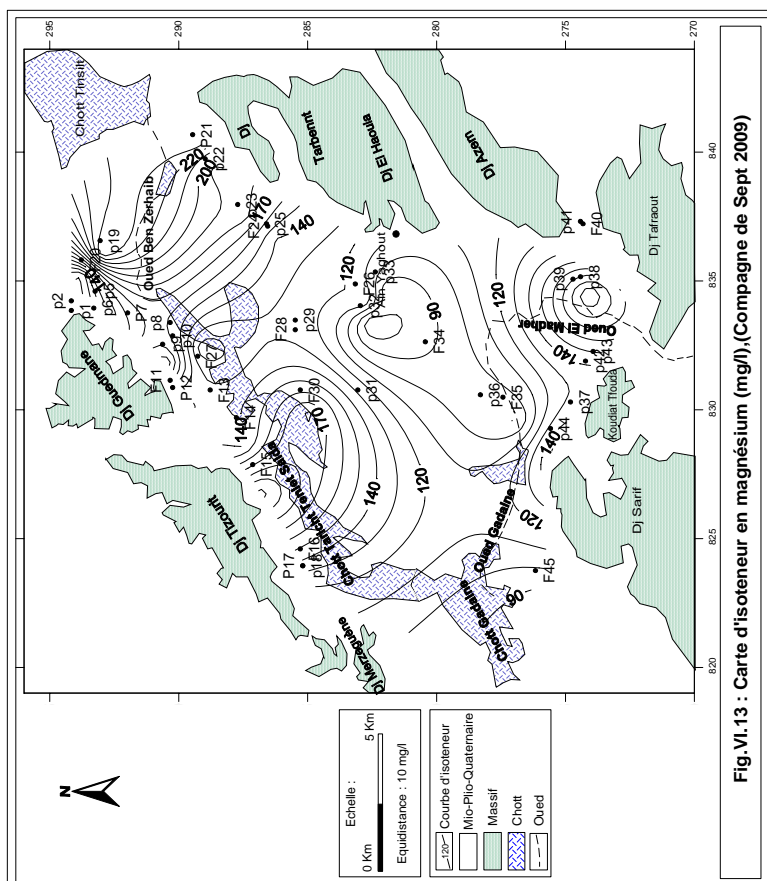
VI.3.2. Cartes du magnésium :

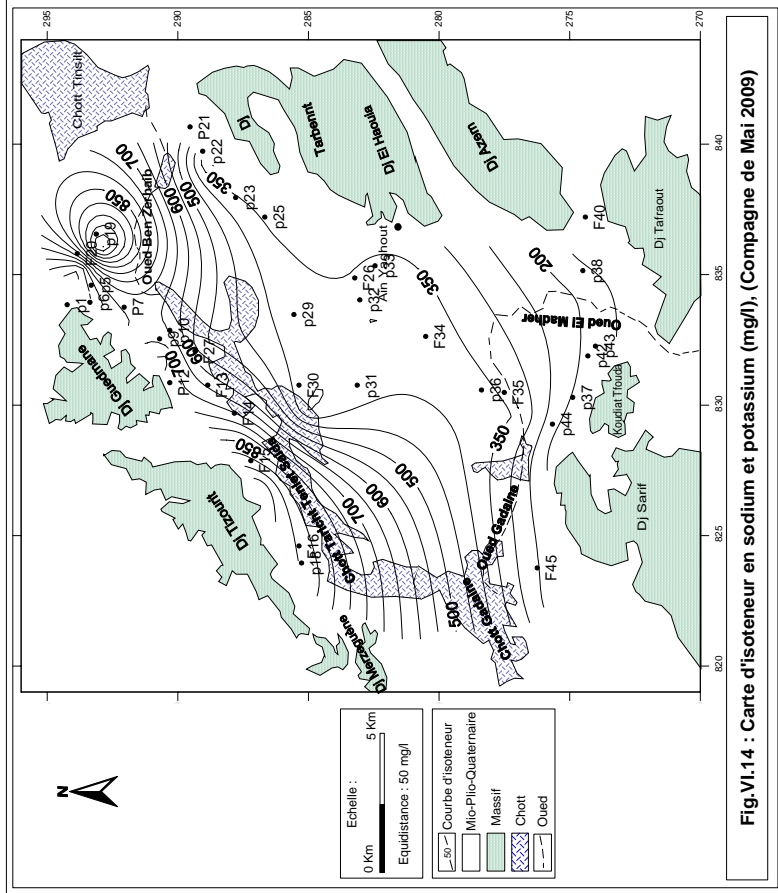
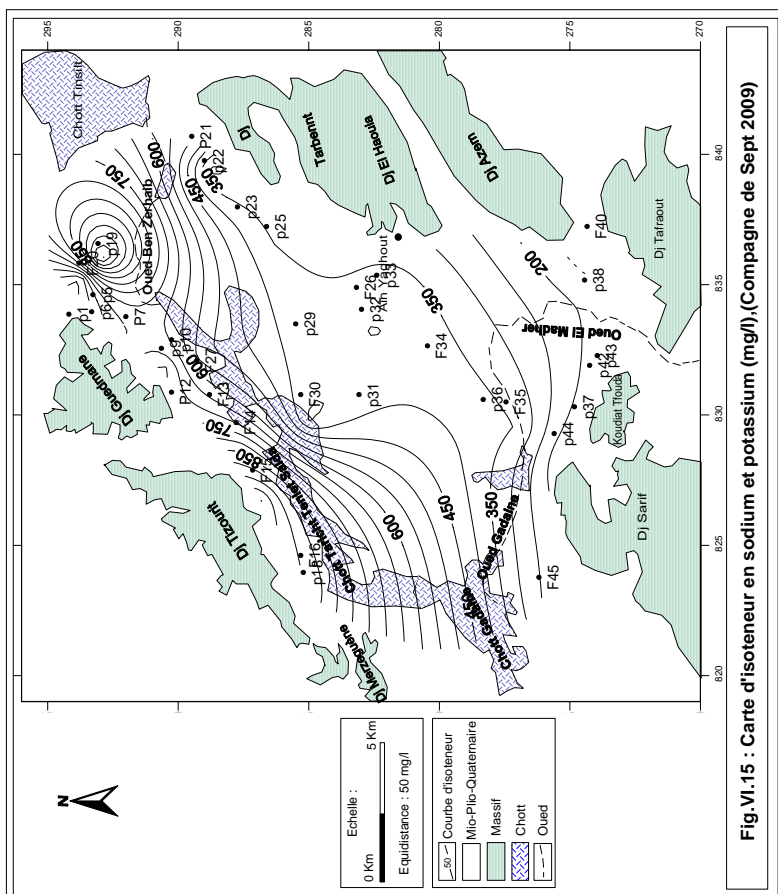
Pour la campagne de Mai 2009, la teneur minimale du magnésium est enregistrée au puits 32 avec 69 mg/l et la teneur maximale est enregistrée au puits 39 avec 264.38 mg/l. Pour la campagne de Sept 2009, les teneurs de magnésium varie entre 70 mg/l au puits 32 et 241 mg/l au puits 19. Les cartes (Fig.VI.12 et VI.13) montrent que les valeurs de la partie centrale et le Sud du chott Gadaïne sont inférieures à 87 mg/l, alors que les valeurs élevées (>180 mg/l) s'observent au tour des massifs carbonatés, cette augmentation est due à l'influence des formations carbonatées telles que les calcaires, les calcaires dolomitiques et les dolomies d'une part, et les formations salifères d'autre part comme les argiles et les marnes, qui sont riches en Mg^{2+} .

VI.3.3. Cartes du sodium et du potassium :

Les concentrations en sodium et en potassium des eaux de la région d'étude varient entre 66 mg/l et 1131 mg/l, pour la première campagne et entre 69 mg/l et 1130 mg/l, pour la deuxième campagne. Les cartes de répartition du sodium et du potassium (Fig.VI.14 et VI.15) montrent une augmentation des concentrations du Nord et de l'Ouest de la plaine vers le Sud de celle-ci. Cette élévation est due à la présence des formations triasiques (marnes) et des évaporites du chott salé.







VI.3.4. Cartes des chlorures :

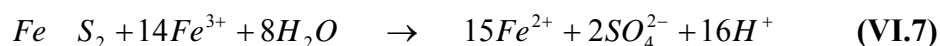
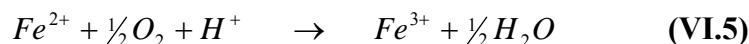
Les chlorures peuvent avoir une origine multiple ; soit par contamination par les eaux usées, soit par la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères surtout du Trias. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leurs présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argileuses et marneuses. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de corrosion des canalisations et des réservoirs à partir de 50 mg/l (norme de l'O.M.S).

Pour la première compagne, les valeurs des Chlorures varient entre 226 mg/l (près de Dj Tafraout) et 1918 mg/l (au voisinage du Dj Tizourit). Pour la deuxième compagne, les valeurs varient entre 235 mg/l et 1959 mg/l. Les cartes (Fig.VI.16 et VI.17) montrent que les faibles teneurs se trouvent au centre et au Sud de la plaine, alors que les fortes teneurs sont centrées au Nord et à l'Ouest de la plaine.

VI.3.5. Cartes des sulfates :

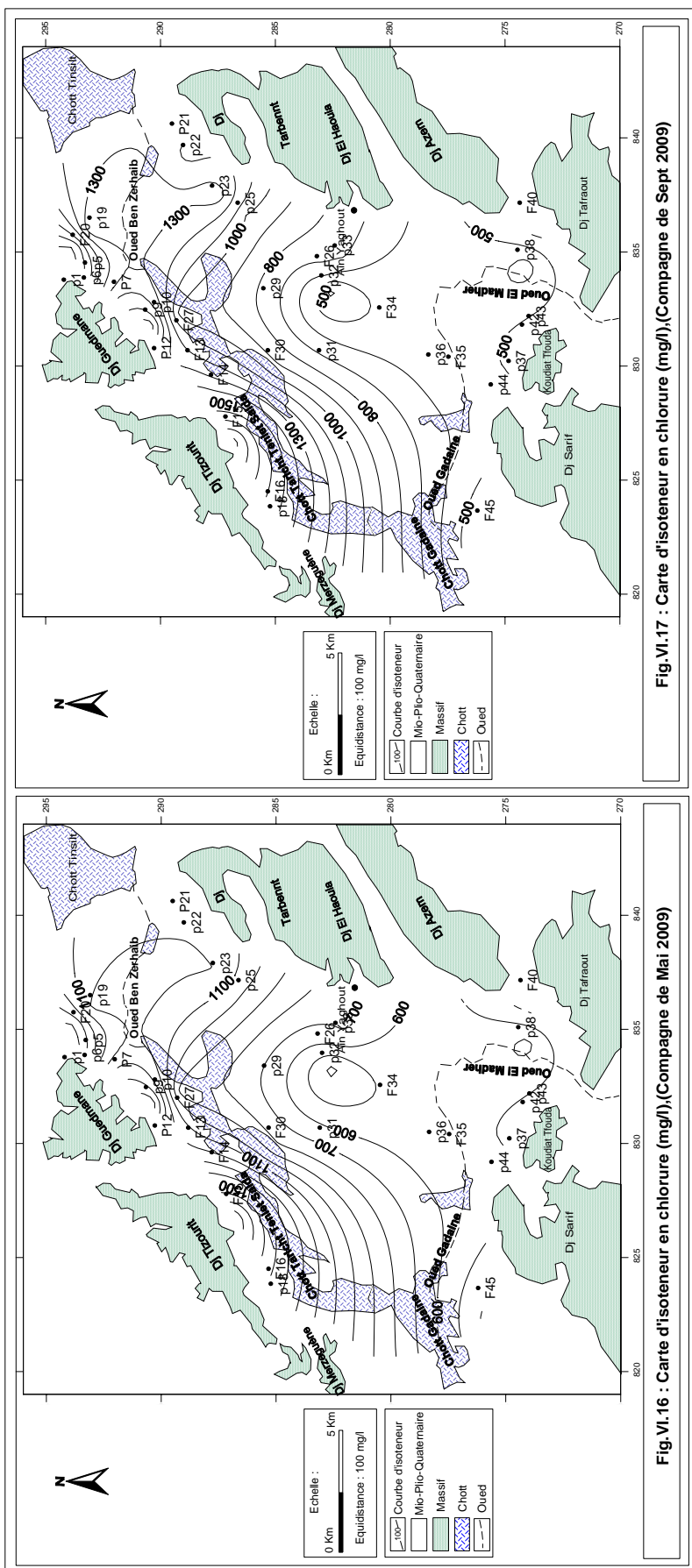
Ils sont présents dans les eaux naturelles à des profondeurs très variables. Ils peuvent provenir de :

- ❖ La dissolution des minéraux sulfurés d'une manière générale comme la pyrite selon le processus suivant :



- ❖ L'oxydation des sulfures d'hydrogène et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère.

Pour la première compagne, les résultats des analyses des sulfates donnent des valeurs variant entre 93 mg/l et 591 mg/l. Pour la deuxième compagne, ces valeurs varient entre 126 mg/l et 583 mg/l. D'après les cartes de répartition de cet élément (Fig.VI.18 et VI.19), les valeurs les plus élevées (>450 mg/l) se situent au pied du Dj Tizourit et au centre de la plaine; par contre les moins élevées sont localisées à l'Est et au Sud. Cette augmentation est en liaison d'une part; avec le lessivage du gypse triasique des monts d'Ain Yaghout et d'autre part avec les eaux usées contenant de l'acide sulfurique (H₂SO₄) qui proviennent de la ville d'Ain Yaghout et le lessivage des engrais utilisés pour l'agriculture.



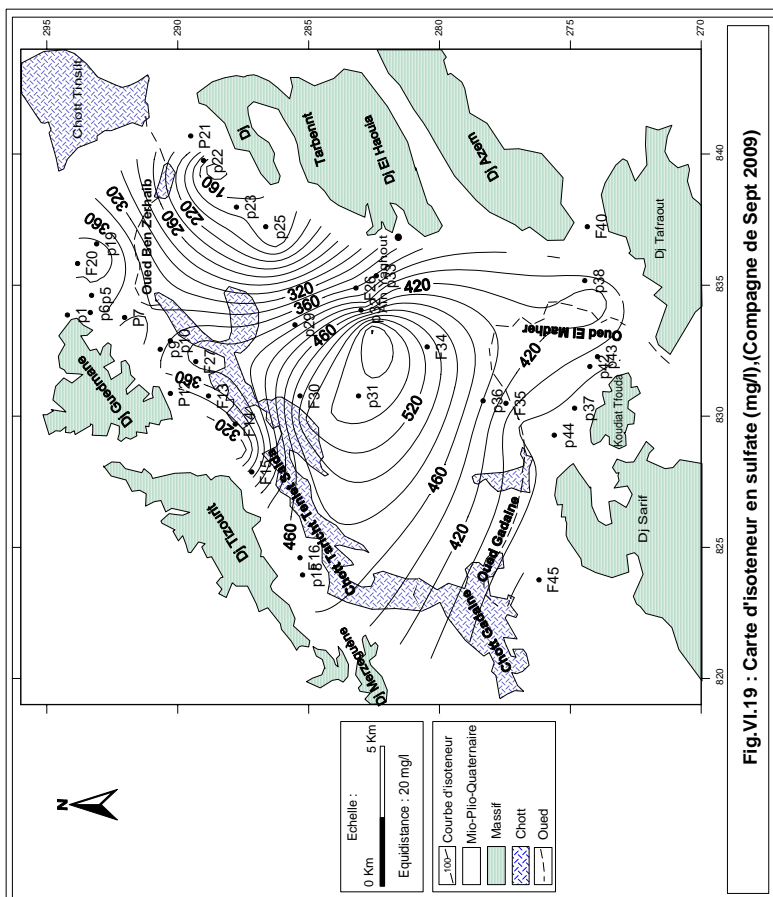


Fig.VI.19 : Carte d'isoteneur en sulfate (mg/l),(Compagne de Sept 2009)

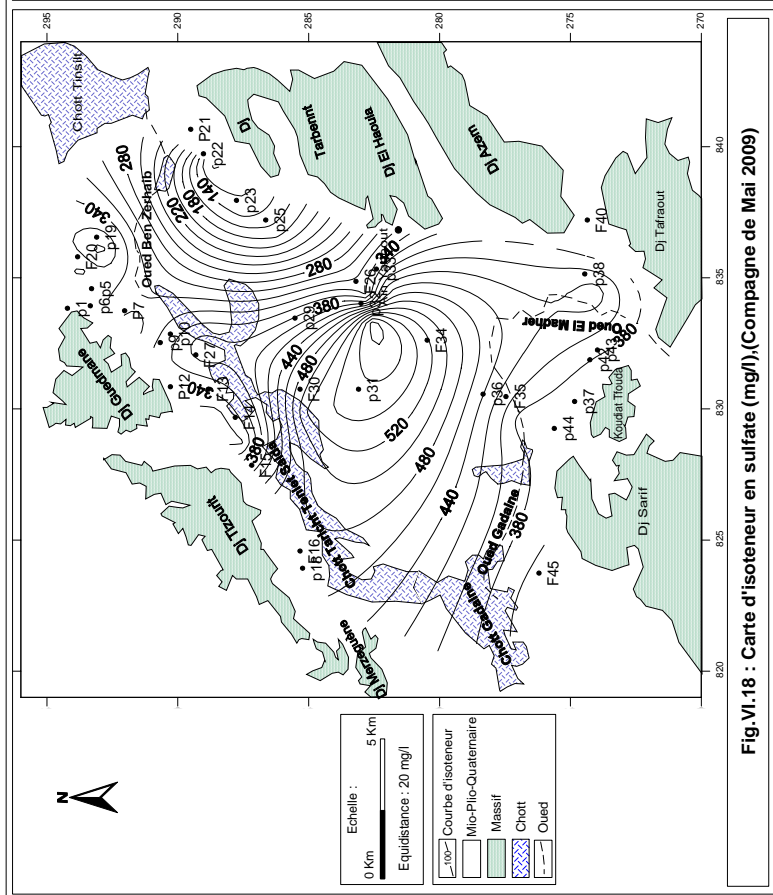
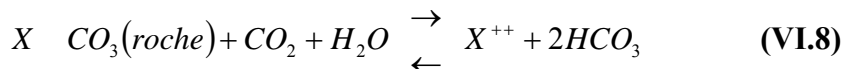


Fig.VI.18 : Carte d'isoteneur en sulfate (mg/l),(Compagne de Mai 2009)

VI.3.6. Cartes des bicarbonates :

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale suivante :



Remarque :

L'élément (X) peut être le (Ca^{++}) ou le (Mg^{++}), il est beaucoup probable que ce soit le Ca^{++} , car le Mg^{++} est très soluble, sauf si l'eau est thermale.

Donc l'origine principale des carbonates est la dissolution des roches carbonatées et gypsifères (Trias).

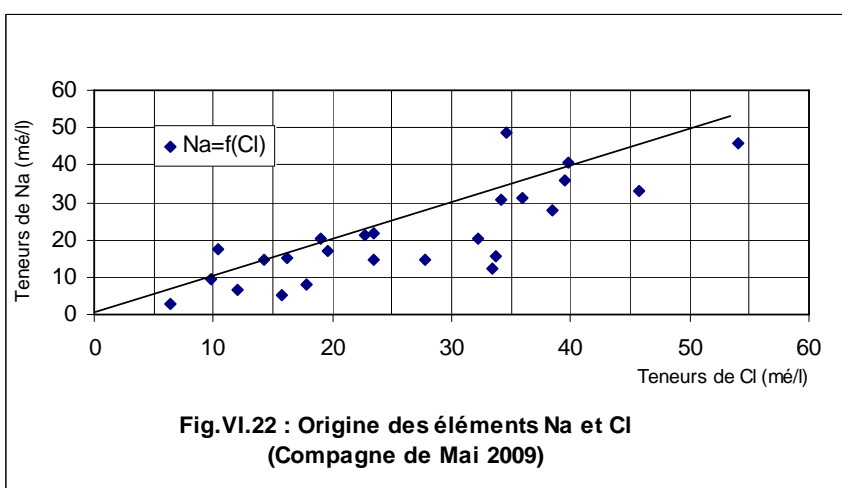
Pendant la première campagne, les concentrations des bicarbonates dans la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout varient entre 186 mg/l et 1860 mg/l. Pour la deuxième campagne, ces concentrations varient entre 191 mg/l et 1871 mg/l. D'après les cartes (Fig.VI.20 et VI.21), les fortes teneurs se localisent à proximité des massifs carbonatés. Elles diminuent progressivement vers le centre.

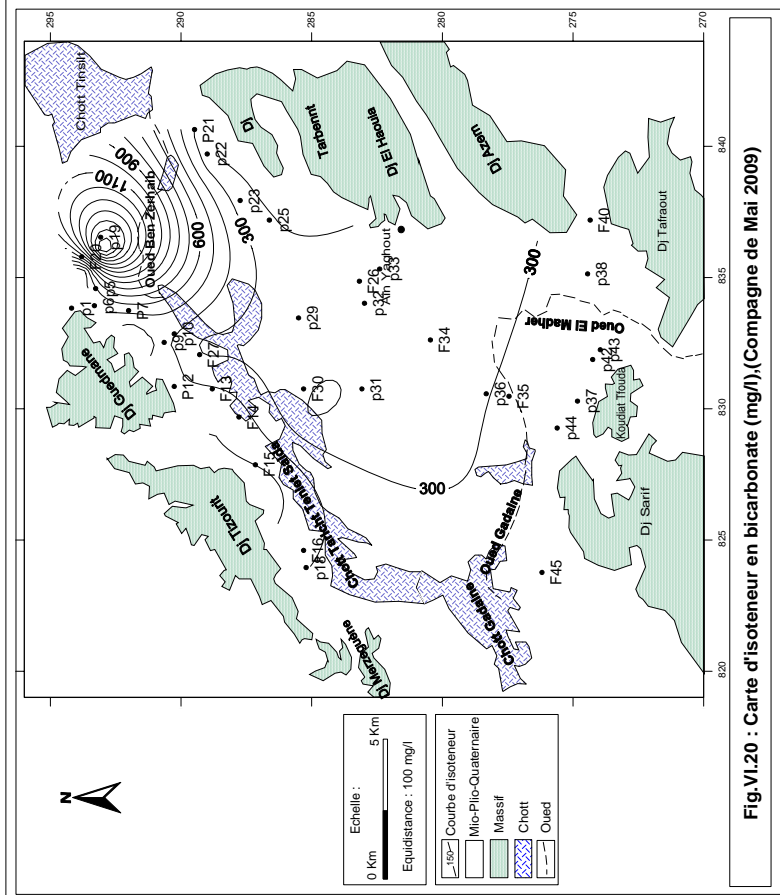
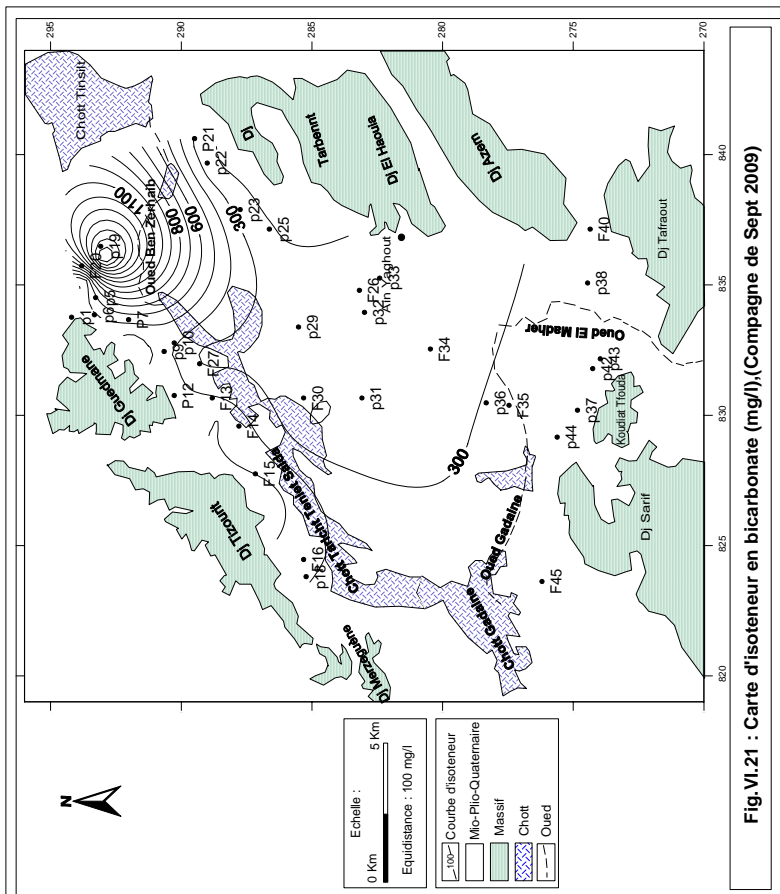
VI.4. Etude de l'origine des éléments dominants et les rapports caractéristiques :

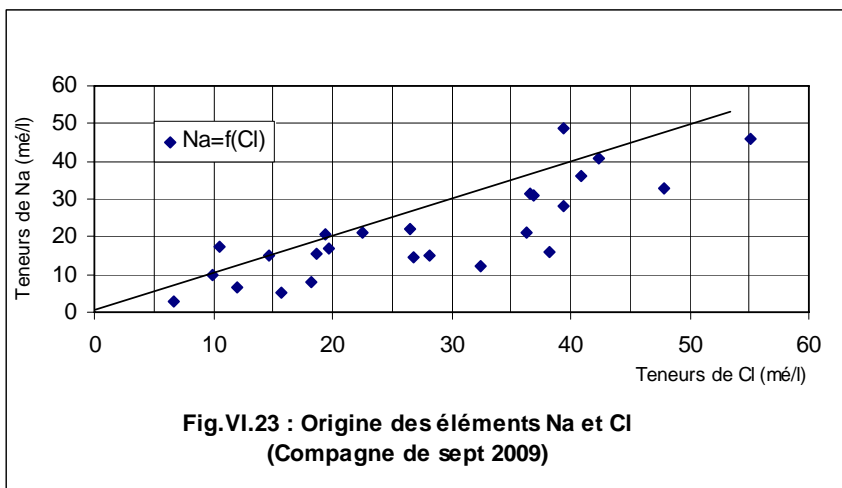
VI.4.1. Origine des éléments Na^{\pm} et Cl^{\pm} :

Pour avoir une idée sur les éléments dominants, nous avons fait une représentation graphique sur une échelle arithmétique avec en abscisse la teneur en milliéquivalent des chlorures et en ordonnée celle du sodium.

L'examen des figures VI.22 et VI.23 permet de remarquer que la majorité des points d'eau des deux campagnes se trouvent au-dessous de la droite d'une pente égale à 1. Dans ce cas c'est les chlorures qui prédominent sur le sodium à cause d'un excès de dissolution de cet élément.



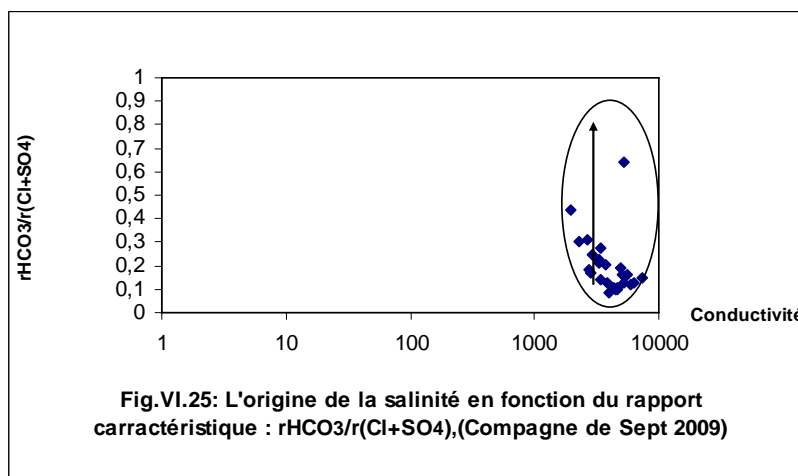
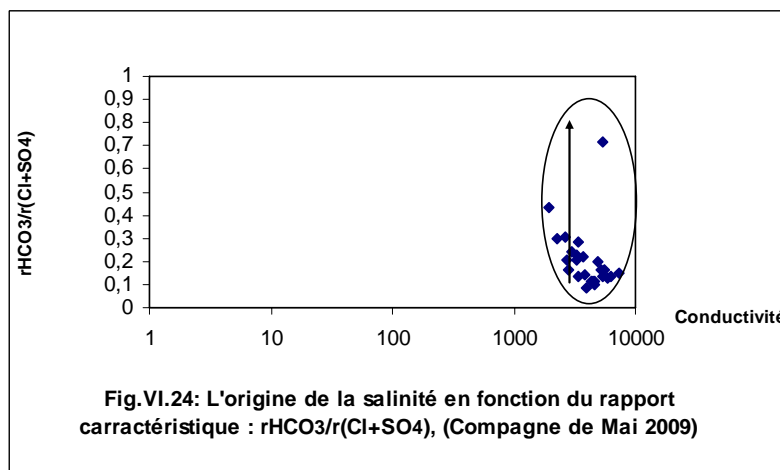




VI.4.2. Les rapports caractéristiques :

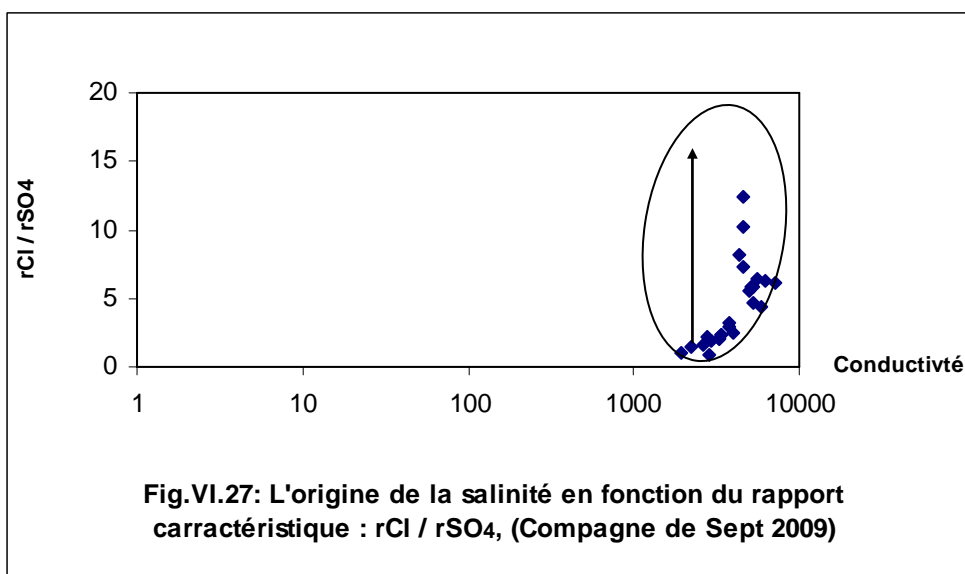
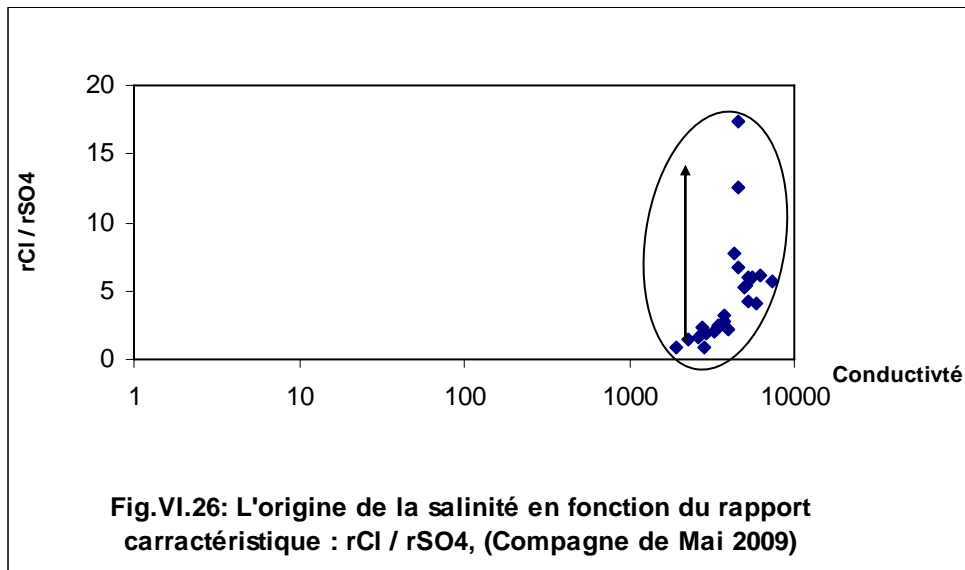
VI.4.2.1. La relation $r\text{HCO}_3^- / r(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-)$ - conductivité électrique :

Les graphes (Fig.VI.24 et VI.25) nous permettent de constater que tous les points d'eau se rassemblent d'une façon à constituer un pôle évaporitique où les ions Cl^- et SO_4^{2-} sont dominants pour une conductivité supérieure à 1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



VI.4.2.2. La relation $r_{Cl^-} / r_{SO_4^{2-}}$ - conductivité électrique :

Le rapport $r_{Cl^-} / r_{SO_4^{2-}}$ nous permet de déterminer la manière selon laquelle évolue la dissolution des ions évaporitiques (SO_4^{2-} marqueur du gypse) en fonction de la conductivité. Le report des points sur les graphiques (Fig.VI.26 et VI.27) nous montre que la majorité des points présente un rapport supérieur à 1, indiquant une dominance des ions chlorurés par rapport aux sulfates pour une conductivité supérieure à 2250 $\mu S/cm$.



VI.5. Indice d'échange de base (i.e.b) :

L'indice d'échange de base défini par SCHOELLER en 1934 est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau. Il est obtenu par la relation (VI.9) :

$$i.e.b = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rCl^-} \quad \text{(VI.9)}$$

Si l'i.e.b est négatif, les ions Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de l'eau sont échangés contre les ions K⁺ et Na⁺ des formations encaissantes. Par contre si l'i.e.b est positif, les ions Na⁺ et K⁺ de l'eau sont remplacés par les ions Mg⁺⁺ et Ca⁺⁺ des formations encaissantes. Dans le cas où l'i.e.b est négatif c'est-à-dire lorsqu'il y a échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins des permutoles, il est préférable de calculer l'i.e.b par la

formule (VI.10) :

$$i.e.b = \frac{rCl^- - r(Na^+ + K^+)}{rSO_4^{--} + rHCO_3^- + rNO_3^-} \quad \text{(VI.10)}$$

L'utilisation de cet indice est importante car il met en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son parcours souterrain.

L'interprétation des données de l'i.e.b calculé (Annexe IV) a montré que la majorité des eaux souterraines de notre plaine ont un i.e.b positif, donc ces eaux sont d'origine sédimentaire et ayant subi un échange de base.

VI.6. Qualité chimique des eaux :

La qualité chimique des eaux a été déterminée en utilisant d'une part les normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) et d'autre part le Degré Hydrométrique (D.H.T).

VI.6.1. Potabilité des eaux :

Afin de définir la potabilité des eaux souterraines, nous allons nous baser sur deux types de normes :

VI.6.1.1. Normes selon l'O.M.S :

L'examen du tableau VI.6 montre que la majorité des échantillons ont des teneurs en NO₃⁻ inférieures aux normes. Pour les sulfates ; 12 % à 16 % des eaux ont des teneurs inférieures aux normes. Les chlorures représentent un pourcentage de 4 % des teneurs inférieures aux normes, tandis que 4 % à 8 % des échantillons ont des teneurs en calcium inférieures aux normes. Pour le magnésium tous les échantillons ont des teneurs supérieures aux normes fixées par l'O.M.S.

Tableau VI.6 : Normes de potabilité selon l'O.M.S. 2008.

Eléments chimiques	Valeurs guides (mg/l)	Pourcentage des échantillons ayant une concentration inférieure aux valeurs guides	
		Mai 2009	Sept 2009
		Calcium	100
Magnésium	50	00	00
Sulfates	250	16	12
Chlorures	250	04	04
Nitrates	50	84	84

O.M.S : Organisation Mondiale de la Santé.

VI.6.1.2. Normes selon le degré hydrométrique total (D.H.T) :

Le degré hydrométrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium :

$$DHT = rCa^{++} + rMg^{++} \quad (\text{en méq/l}) \quad (\text{VI.11})$$

$$DHT = (rCa^{++} + rMg^{++}) \times 5 \quad (\text{en degré Français } ^{\circ}F) \quad (\text{VI.12})$$

Le tableau VI.7 montre que la quasi-totalité des eaux analysées sont très dures, avec un D.H.T supérieur à 54 °F. Cette dureté a des conséquences plus ou moins néfastes telles que la consommation excessive du savon et la mauvaise cuisson des légumes secs. Nous pouvons dire que les eaux souterraines de notre région d'étude sont de qualité chimique médiocre et donc impropre à la consommation.

Tableau VI.7 : Dureté des eaux en °F selon W. THEOBALD et A. GAMA, 1969.

D.H.T (en °F)		0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54
Qualification de l'eau		Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
% des points	Mai	0	0	0	4	96
	Sept	0	0	0	4	96

VI.6.2. Aptitude à l'irrigation :

Par sa qualité chimique, l'eau souterraine doit être destinée en priorité à l'AEP, mais malheureusement au niveau de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout, les aquifères sont exploités d'une

manière anarchique et dont les eaux sont destinées à l'irrigation. Afin d'estimer l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Pour cela, nous allons utiliser plusieurs méthodes afin de les classer :

VI.6.2.1. Salinité :

Selon R. S. AYERS et D. W. WESTCOT (1988) ; quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Tableau VI.8) montrent que :

- ❖ Si la salinité exprimée par la conductivité est inférieure à 700 $\mu\text{S} / \text{cm}$, il n'y a aucune restriction pour l'irrigation ;
- ❖ Si la conductivité varie entre 700 et 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est légère à moyenne ;
- ❖ Si elle est supérieure à 3000 $\mu\text{S} / \text{cm}$, la restriction pour l'irrigation est forte.

Tableau VI.8 : Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Salinité).

Restriction pour l'irrigation	CE en $\mu\text{S} / \text{cm}$	Pourcentage des échantillons	
		Mai	Sept
Aucune	< 700	0	0
Légère à modérée	700 - 3000	24	20
Forte	> 3000	76	80

L'examen du tableau VI.8 montre que la majorité des points d'eau de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout représentent une restriction forte pendant les deux périodes. En cas d'irrigation par des eaux chargées en sels, on peut s'attendre à des chutes de rendements (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988) de certaines cultures pratiquées au niveau de cette plaine (Tableau VI.9).

Il est recommandé dans ce cas d'utiliser ces eaux pour des cultures tolérant le sel, de pratiquer des cultures sur les sols légers (sableux), de faire des apports d'eau supplémentaires et de faire un drainage.

VI.6.2.2. Infiltration :

Les problèmes d'infiltration liés à la qualité de l'eau apparaissent lorsque la vitesse de pénétration de l'eau d'irrigation ou de la pluie est notablement réduite provoquant une stagnation de l'eau à la surface du sol et diminution de la qualité d'eau mise en réserve tandis que la salinité diminue la disponibilité de l'eau en réserve.

VI.6.2.2.1. Eaux peu salées :

Les eaux peu salées dont la conductivité électrique est inférieure à 200 $\mu\text{S} / \text{cm}$ ont une forte tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol, ce qui entraîne plus la dispersion des particules (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988) et l'obturation des espaces poreux.

La valeur minimale de conductivité des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout est supérieure à 200 $\mu\text{S} / \text{cm}$, donc ce problème ne se pose pas.

VI.6.2.2.2. Eaux à forte teneur en sodium :

L'abondance du sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et la destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988). Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque de salinité est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable : « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le S.A.R est plus élevé. Ce dernier est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq/l.} \quad (\text{VI.13})$$

VI.6.2.2.2.1. Classification de Richards :

Le tableau VI.9 récapitule les résultats obtenus après interprétation de diagramme de Richards (Fig.VI.28) :

Ces résultats montrent que la majorité des points d'eau représentent un danger d'alcalinisation moyen à fort, alors que le danger de salinité est très élevé. Donc ces eaux représentent un danger pour la plante et pour le sol.

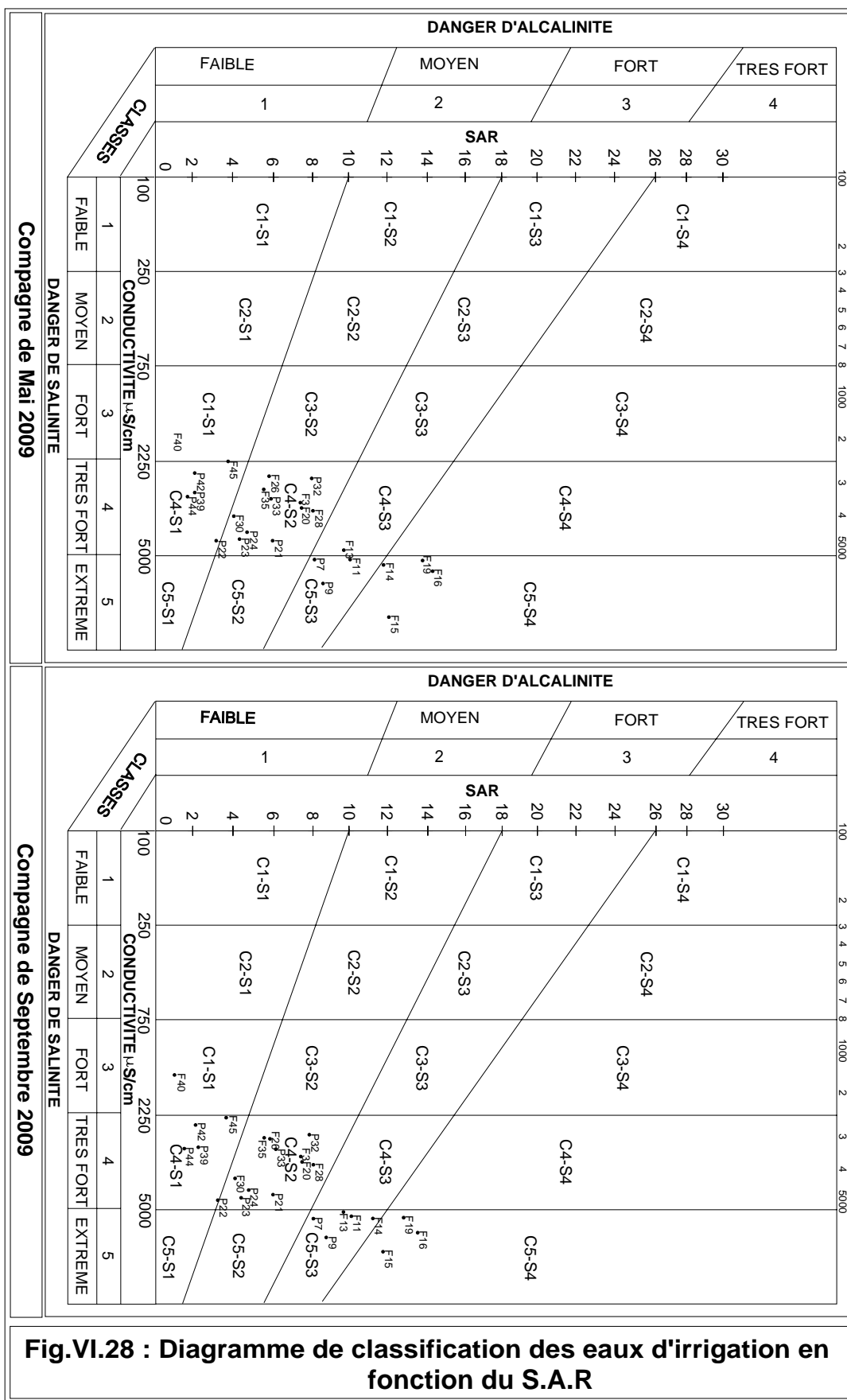


Fig.VI.28 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R

Tableau VI.9: Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.

Classe		Pourcentage des points d'eau	
		Mai	Sept
Admissible	C3S1	4	4
Médiocre	C4S1	20	20
Mauvaise	C4S2+C4S3 C5S3+C5S4	76	76

VI.6.2.3. Etude de la toxicité des végétaux :

La toxicité se manifeste dans les végétaux suite à l'absorption et à l'accumulation de certaines substances contenues dans l'eau d'irrigation. Ces substances toxiques provoquent l'échec de la récolte comme le cas du sodium et celui du chlore.

VI.6.2.3.1. Sodium :

L'emploi d'une eau d'irrigation riche en sodium se traduit généralement par une accumulation du sodium dans le sol. Les modifications qui peuvent apparaître dans le sol sont fonction des fréquences d'irrigations (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988). Les cultures absorbent le sodium en même que l'eau et celui-ci se concentre dans les feuilles tandis que l'eau s'échappe par transpiration. Il peut en résulter une toxicité si l'accumulation de sodium atteint une concentration dépassant la tolérance de la culture. Les symptômes caractéristiques en sont les brûlures et le roussissement du feuillage ainsi qu'une nécrose des tissus situés sur le bord des feuilles. Souvent la toxicité par le sodium se modifie et s'atténue en présence du calcium.

L'interprétation des analyses du tableau (VI.10) des directives, permet de dire que :

- ❖ 04 % des points d'eau ne présentent aucune restriction pour l'irrigation ;
- ❖ 12 % des points d'eau présentent une restriction légère à modérée ;
- ❖ La restriction est forte pendant les deux mois pour 84 % des points d'eau.

**Tableau VI.10 : Directives concernant la qualité de l'eau d'irrigation
(Toxicité spécifique de certains ions).**

		Sodium (méq/l)	% des points d'eau		Chlore (méq/l)	% des points d'eau	
			Mai	Sept		Mai	Sept
Restriction pour l'irrigation	Aucune	< 3	4	4	< 4	0	0
	Légère à modéré	3 - 9	12	12	4 - 10	8	8
	Forte	> 9	84	84	> 10	92	92

VI.6.2.3.1.1. Classification de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, est définie par la formule suivante :

$$\%Na^+ = \frac{Na^+}{Ca^{++} + Mg^{++} + Na^+ + K^+} \times 100, \text{ où tous les éléments sont exprimés en méq / l.} \quad \text{(VI.14)}$$

Cette classification définit cinq classes d'eau qui sont : Excellente – Bonne – Admissible - Médiocre – Mauvaise (Fig.VI.29).

D'après le tableau VI.11, 16 % à 20 % des points d'eau pendant les deux campagnes sont médiocres et 76 % à 80 % des points d'eau sont de mauvaise qualité; tandis que seulement 4 % de ces points d'eau sont de bonne qualité.

Tableau VI.11: Résultats d'utilisation du diagramme de Wilcox.

Classe	Pourcentage des points d'eau	
	Mai	Sept
Excellente	0	0
Bonne	4	4
Médiocre	20	16
Mauvaise	76	80

VI.6.2.3.2. Chlore :

Le chlore est un ion qui n'est pas absorbé par le sol mais se déplace facilement avec l'eau du sol. Il est absorbé par les racines et s'accumule dans les feuilles, comme le sodium (R. S. AYERS et D. W.

WESTCOT, 1988). Les symptômes se manifestent par des brûlures du feuillage. Pour évaluer le degré de toxicité du chlore, on utilise le tableau VI.10. Ce tableau montre que les teneurs en chlore comprises entre 4-10 méq/l constituent une restriction légère à modérée et elles correspondent à 8 % des points d'eau analysés alors que 92 % présentent une forte restriction.

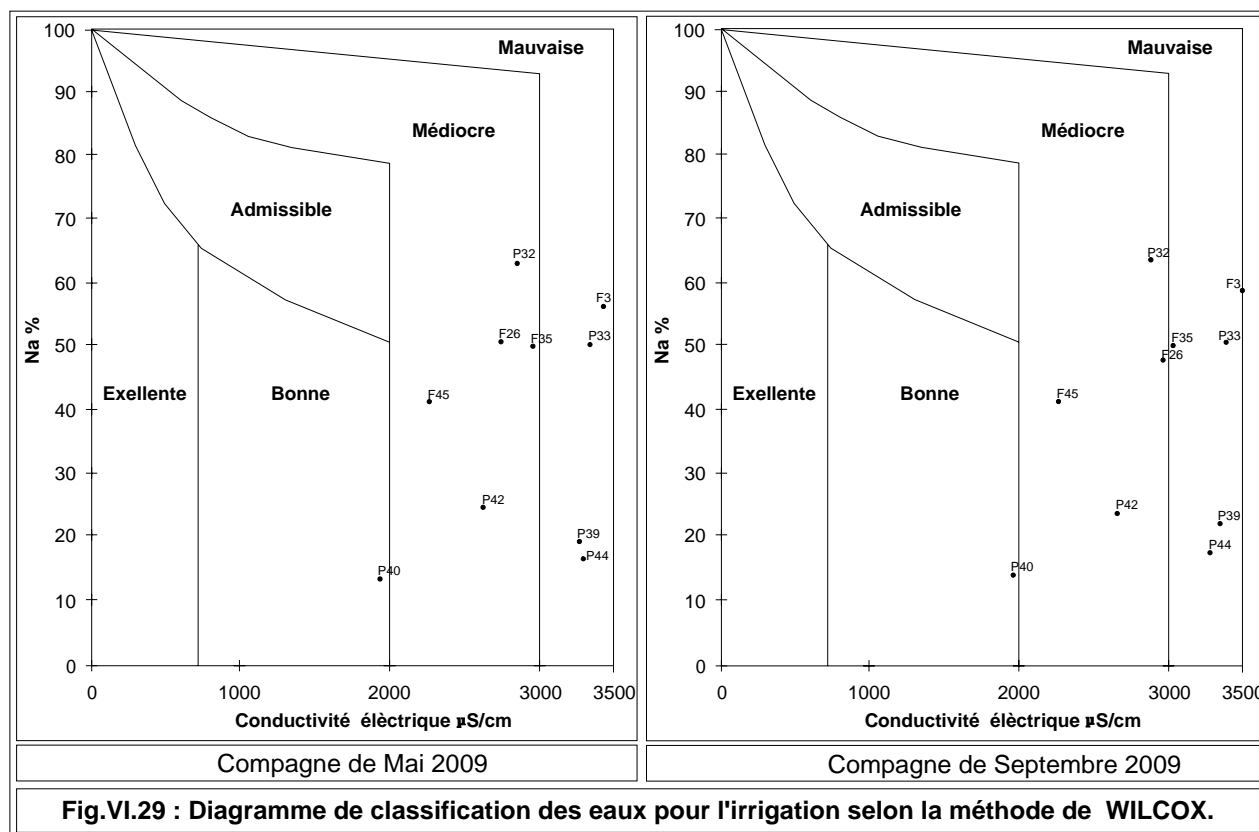


Fig.VI.29 : Diagramme de classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de WILCOX.

VI.7. Effet de la pollution sur la qualité chimique des eaux :

VI.7.1. Introduction :

La pollution de l'environnement a pris ces derniers temps une ampleur considérable devant la situation toujours plus précaire de notre planète. La pollution des eaux continue de préoccuper les autorités et les populations. Elle compromet la santé, menace la vie et entrave l'activité industrielle.

Désormais, la lutte contre la pollution doit être l'affaire de tous. Inéluctablement, les villes s'étendent un peu plus chaque jour en absorbant l'excédent démographique. De ces phénomènes incontrôlables, résulte une augmentation et une diffusion de la pollution qui la rend difficile à maîtriser.

On sait que l'eau est la principale composante du protoplasme cellulaire, elle représente 67 % du poids total de l'homme et jusqu'à 90 % du volume des végétaux. Un minimum de 40 à 50 litres d'eau est utilisé par jour et par personne auquel il convient d'ajouter les besoins en eau pour l'agriculture, l'élevage et l'industrie.

L'O.M.S a fourni en 1961, la définition suivante des eaux polluées : « un cours d'eau est considéré comme étant pollué lorsque la composition ou l'état des eaux sont directement ou indirectement modifiés du fait de l'activité de l'homme dans une mesure telle que celles-ci se prêtent moins facilement à toutes les utilisations au quelle elle pourrait servir à leur état naturel ou à certaines d'autre elles ».

En Algérie, l'important développement industriel et l'urbanisation active qui l'accompagne ont considérablement accru la demande sur le besoin en eau. Ces derniers ont augmenté dans les mêmes proportions en volume.

VI.7.2. Principales sources de pollution dans la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout :

De nombreux éléments chimiques présents dans l'eau d'une manière générale ont une origine naturelle liée essentiellement à la nature géologique des terrains traversés et des précipitations atmosphériques. Il faut ajouter à cela les apports liés à l'activité humaine (urbaine et agricole).

L'évacuation des eaux usées et des eaux de surface devient de plus en plus délicate au fur et à mesure du développement des agglomérations. Une partie de la population d'Ain Yaghout se répartie le long d'oued El Madher et d'autres oueds secondaires et sur la plaine alluviale. Leurs eaux usées sont directement rejetées dans les oueds (sans aucun traitement) qui les véhiculent vers la plaine. Une autre partie des habitants utilisent des fosses septiques (non conformes aux normes) et les oueds comme exutoires à leurs eaux usées. Les ordures ménagères constituent une autre forme de pollution. Leurs rejets anarchiques (sans aucune étude de site) peuvent entraîner de nombreuses pollutions et dangers en portant atteinte à la qualité des eaux souterraines par infiltration, à la qualité de l'air et à l'esthétique du milieu.

L'activité agricole est aussi une source de pollution, cela est dû à l'usage excessif des engrais chimiques et des fumiers pour la fertilisation des sols et à l'élevage intensif des ovins et surtout des bovins.

Afin de cerner le problème de pollution nous avons fait des analyses chimiques portées sur les éléments suivants : NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} et PO_4^{3-} . Dans la partie qui va suivre, nous essayerons d'expliquer la présence de ces éléments dans l'eau.

VI.7.3. Résultats des analyses hydrochimiques des éléments polluants :

Pour illustrer l'effet de la pollution sur les eaux souterraines de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout, nous avons effectué deux campagnes (Mai et Septembre 2009).

Le pourcentage des échantillons de ces deux campagnes est reporté dans le tableau VI.12. L'examen de ce tableau montre que, selon la directive européenne, 16 % d'échantillons d'eau ont des teneurs en NO_3^- et NO_2^- supérieures à la norme maximale admissible, 24 % pour l'ammonium et 4 % pour les phosphates.

Pour le fer, son pourcentage varie entre 8 % et 12 %. Pour le Zinc, le pourcentage varie entre 80 % et 96 % et pour le cuivre 80 % d'échantillons d'eau ont des teneurs supérieures à la norme maximale admissible.

Nous pouvons dire que les eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout sont fortement polluées par le cuivre et le zinc et légèrement polluées par le reste des éléments.

Tableau VI.12: Eléments toxiques ou indésirables dans l'eau potable.

Elément	C.M.A (mg/l)	N.A (mg/l)	% des échantillons ayant une concentration supérieure à C.M.A		% des échantillons ayant une concentration supérieure aux N.A	
			Mai	Sept	Mai	Sept
NO_3^-	50	50	16	16	16	16
NO_2^-	0.100	0.100	16	16	16	16
NH_4^+	0.500	0.500	24	24	24	24
PO_4^{3-}	0.400	0.500	04	04	00	00
Fe^{2+}	0.200	0.300	08	12	00	04
Zn^{2+}	0.100	1.500	80	96	00	00
Cu^{2+}	0.050	0.050	80	80	80	80

N.A : Normes Algériennes de l'eau mise en bouteille, en (mg/l).

C.M.A : Concentration Maximale Admissible selon la directive européenne en (mg/l).

VI.7.4. Cartographie des éléments polluants :

VI.7.4.1. Les éléments nutritifs :

L'eau d'une nappe ne contient pas originellement de composé azoté, c'est l'augmentation artificielle de la quantité d'azote combiné disponible dans le sol qui crée un déséquilibre entre l'apport et la consommation et produit un excès d'azote qui est entraîné vers la nappe.

VI.7.4.1.1. Cartes des nitrates :

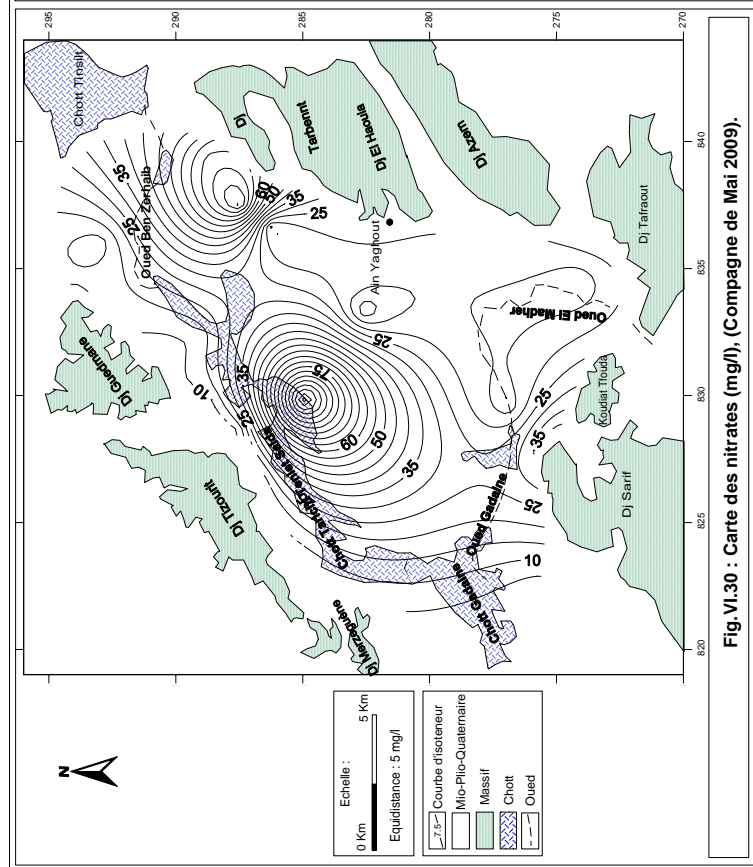
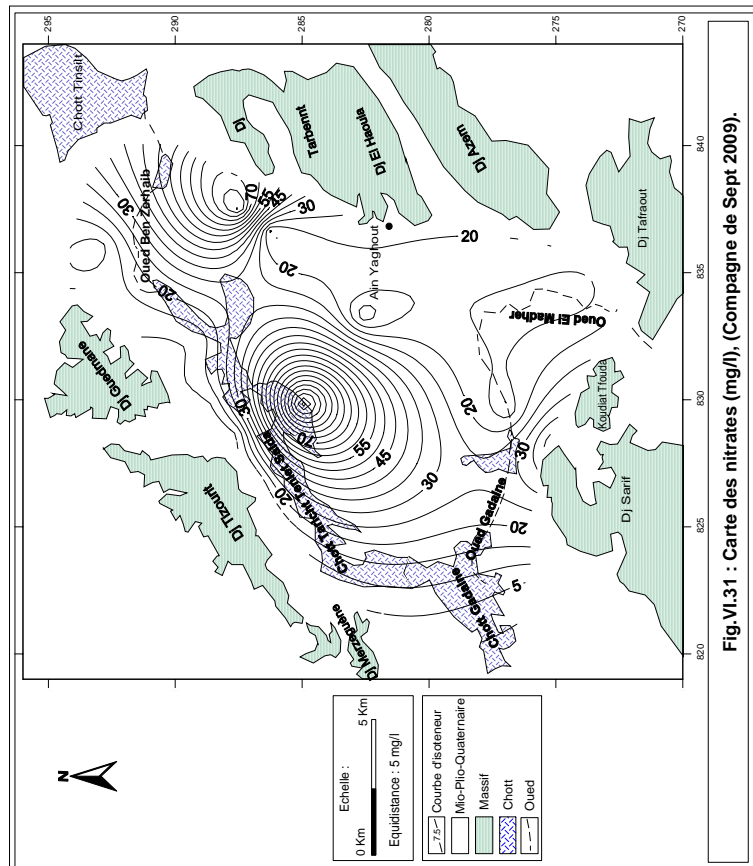
L'examen des cartes des nitrates (Fig.VI.30 et VI.31) montre que dans l'Est (à proximité du Dj Tarbennt) et le centre de la plaine les concentrations dépassent la norme fixée par la CEE (50 mg/l). La présence des nitrates dans les eaux souterraines est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques, des fumiers et aux eaux usées domestiques rejetées dans les oueds et dans les chotts. L'excès des nitrates dans les eaux de consommation provoque la méthémoglobinémie chez les nourrissons appelée également la maladie bleue.

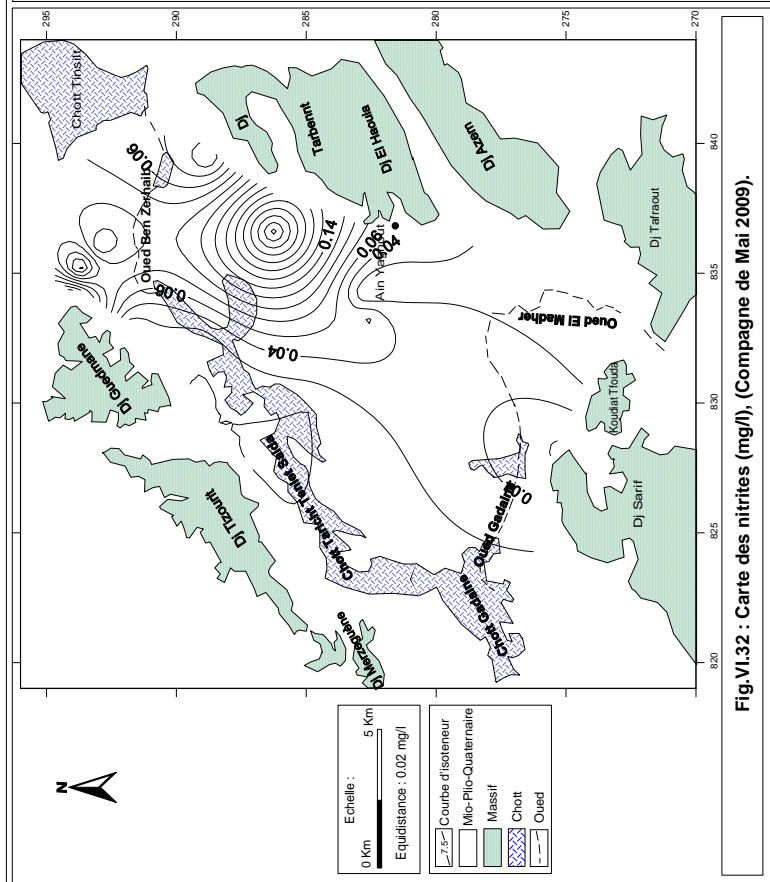
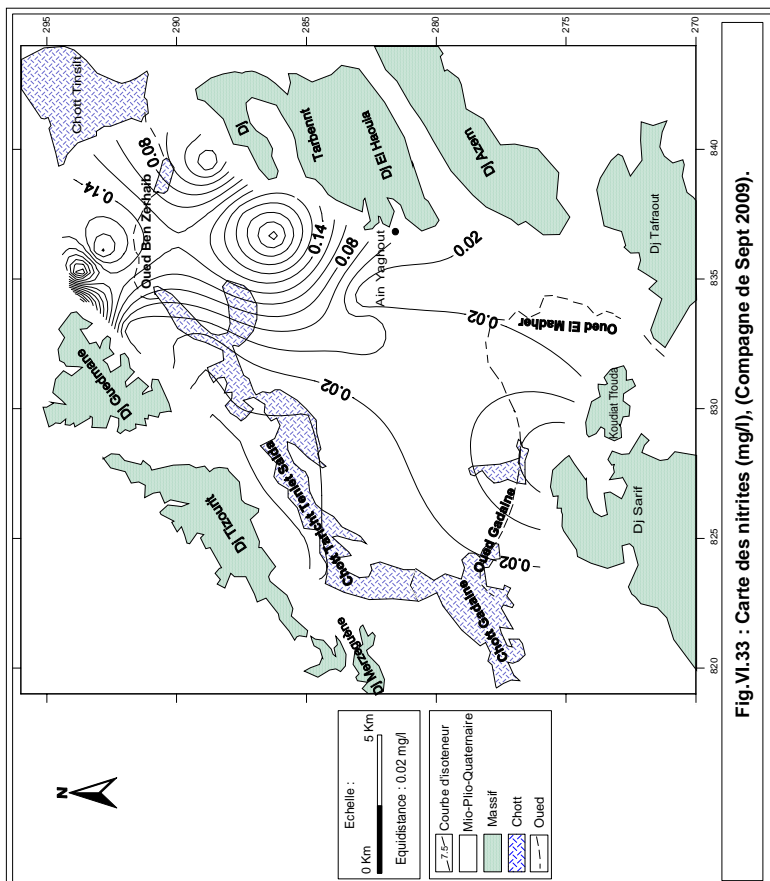
VI.7.4.1.2. Cartes des nitrites :

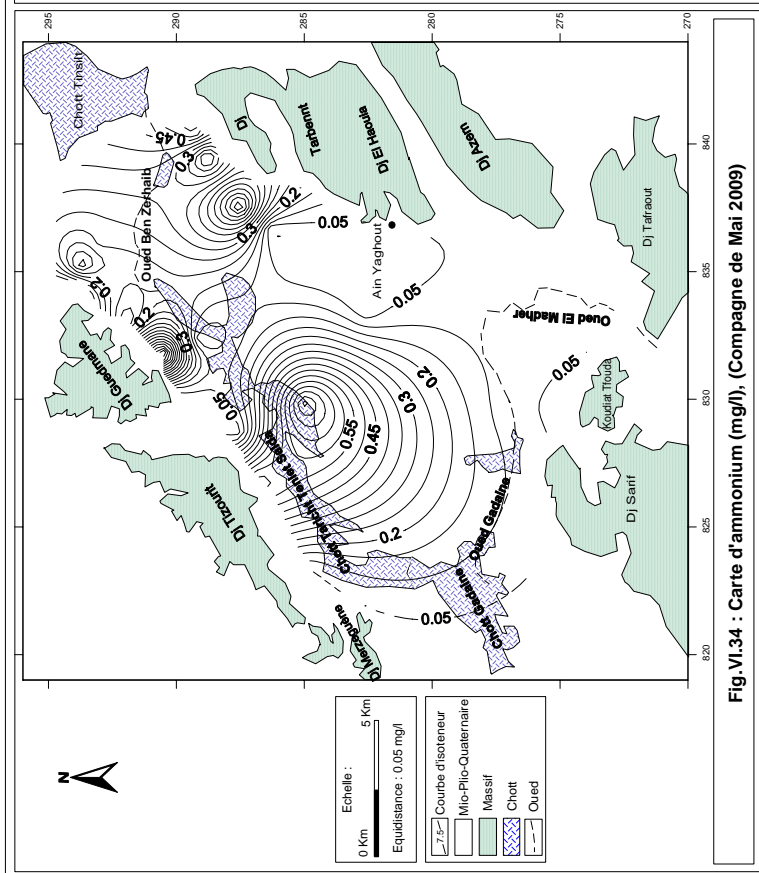
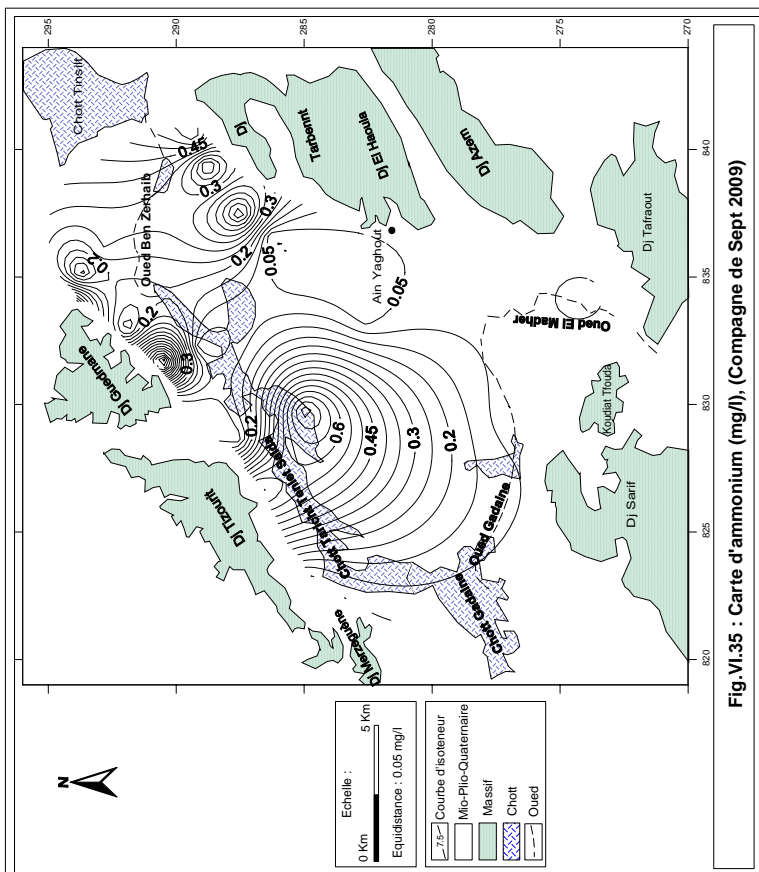
L'examen des cartes (Fig.VI.32 et VI.33) montre que les valeurs de nitrites sont supérieures aux normes (0.1mg/l) dans les puits situés au Nord et à l'Est de la zone d'étude. Toutes les formes d'azote (azote organique, ammoniacque et nitrites) sont susceptibles d'être à l'origine des formations des nitrites par un processus d'oxydation biologique des nitrates, soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniacque (NH_4^+), soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action bactérienne (phénomène de dénitrification).

VI.7.4.1.3. Cartes d'Ammonium :

A partir des cartes (Fig.VI.34 et VI.35), les concentrations en ammonium sont supérieures aux normes (0.5mg/l) dans les puits situés au Nord, à l'Est et au centre de la zone d'étude. La présence de l'ammonium dans l'eau est liée, soit par réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) en conditions réduites, soit aux rejets urbains dans les oueds et les chotts.







VI.7.4.2. Les métaux lourds :

Le fer, le cuivre et le zinc en excès peuvent être responsables selon le cas, de mauvais goût et de coloration anormale, de proférations bactériennes dans les canalisations et de taches sur les linges au cours de son lavage.

VI.7.4.2.1. Cartes de fer :

Pendant la première campagne, les concentrations en fer varient entre 0 mg/l et 0.21 mg/l. Pour la deuxième campagne ces concentrations varient entre 0 mg/l et 0.32 mg/l. Les deux cartes (Fig.VI.36 et VI.37) montrent que les concentrations qui dépassent les normes (0.2 mg/l) se trouvent au Nord du Dj Terbennt et à proximité d'oued El Madher, Cette augmentation est probablement due au lessivage des terrains argileux.

Des intoxications par absorption de sulfates de fer peuvent s'observer chez les enfants.

VI.7.4.2.2. Cartes de cuivre :

Les cartes (Fig.VI.38 et VI.39) montrent que la quasi totalité des eaux de la plaine sont contaminées par le cuivre. Cette augmentation est due à l'utilisation des pesticides, des engrais chimiques et aux déversements d'eaux usées.

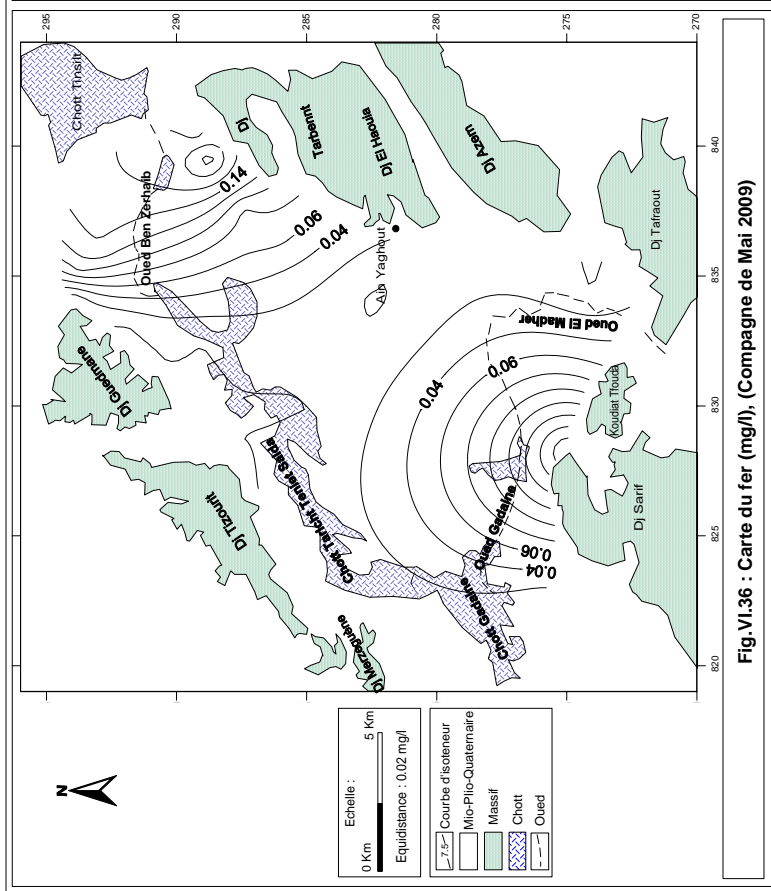
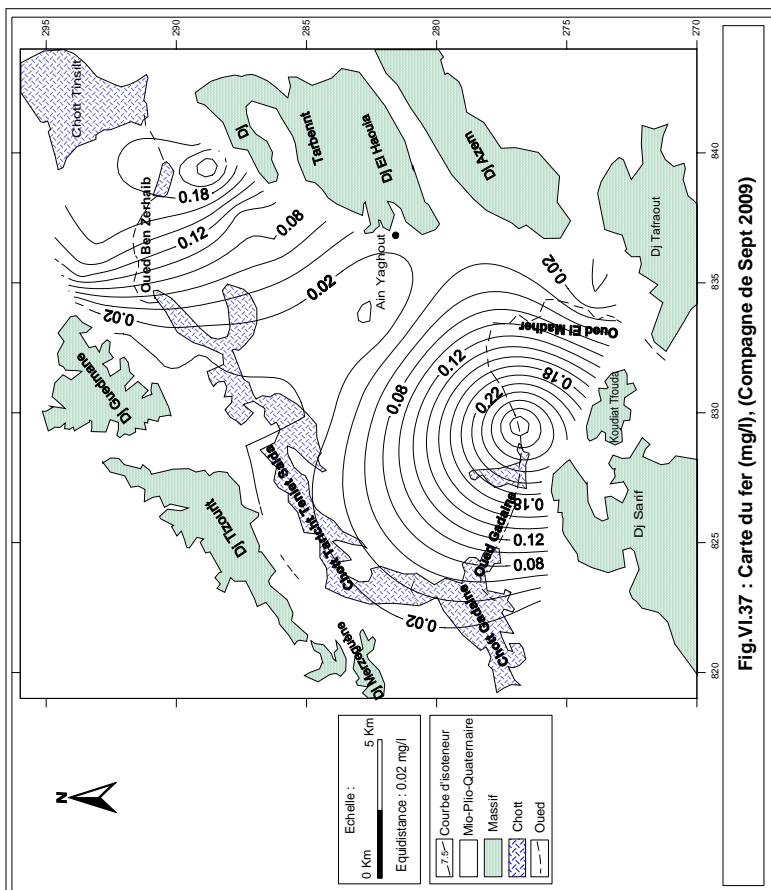
Le cuivre en excès peut provoquer une toxicité pour les dialysés rénaux.

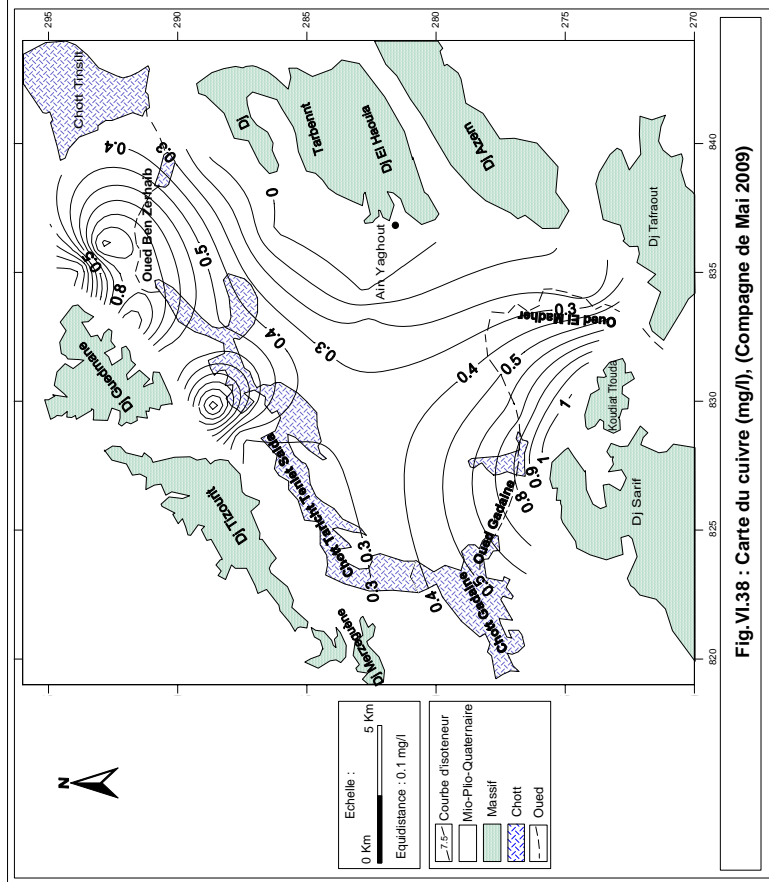
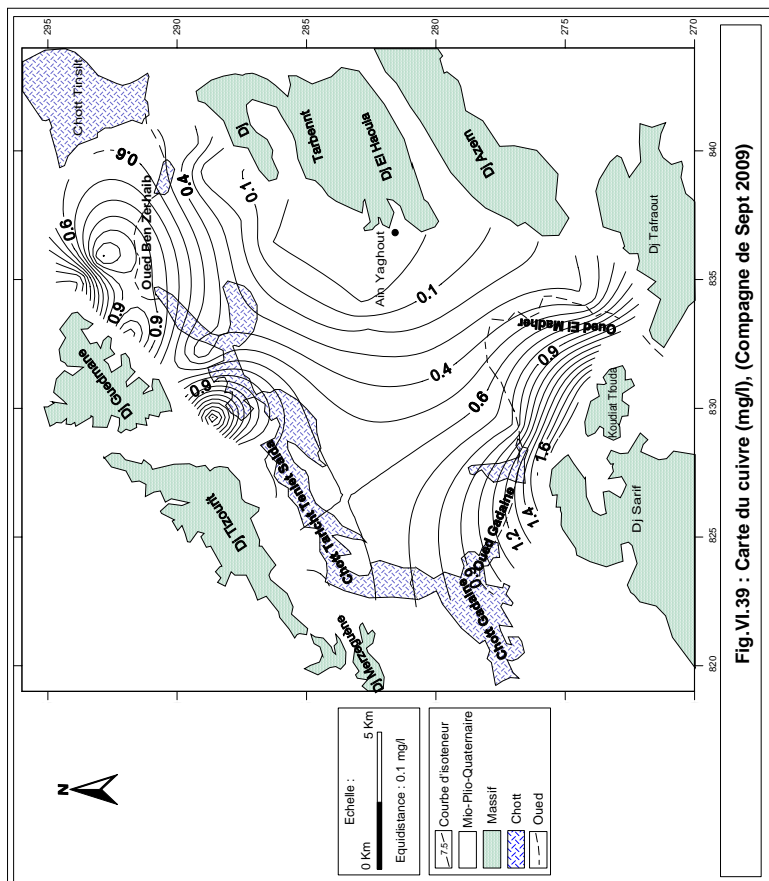
VI.7.4.2.3. Cartes de zinc :

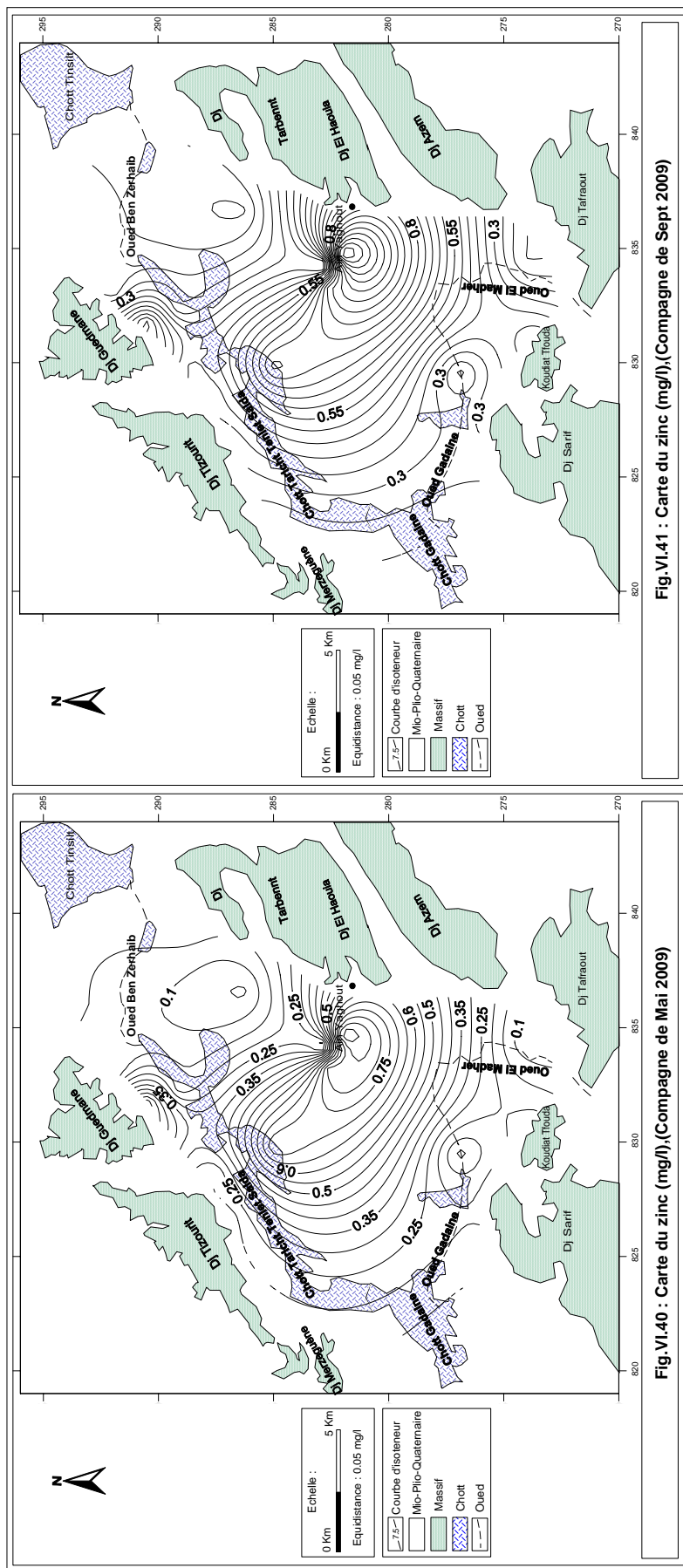
Les cartes (Fig.VI.40 et VI.41) montrent que la quasi totalité des eaux de la plaine présentent des concentrations en zinc élevées sauf au Nord Ouest du Dj Tarbennt où le zinc présente des concentrations inférieures aux normes admises (0.1mg/l). L'augmentation des teneurs en zinc est probablement due à l'influence des formations calcaireuses et à partir de la dissolution des matériaux qui constituent l'équipement des forages et des puits.

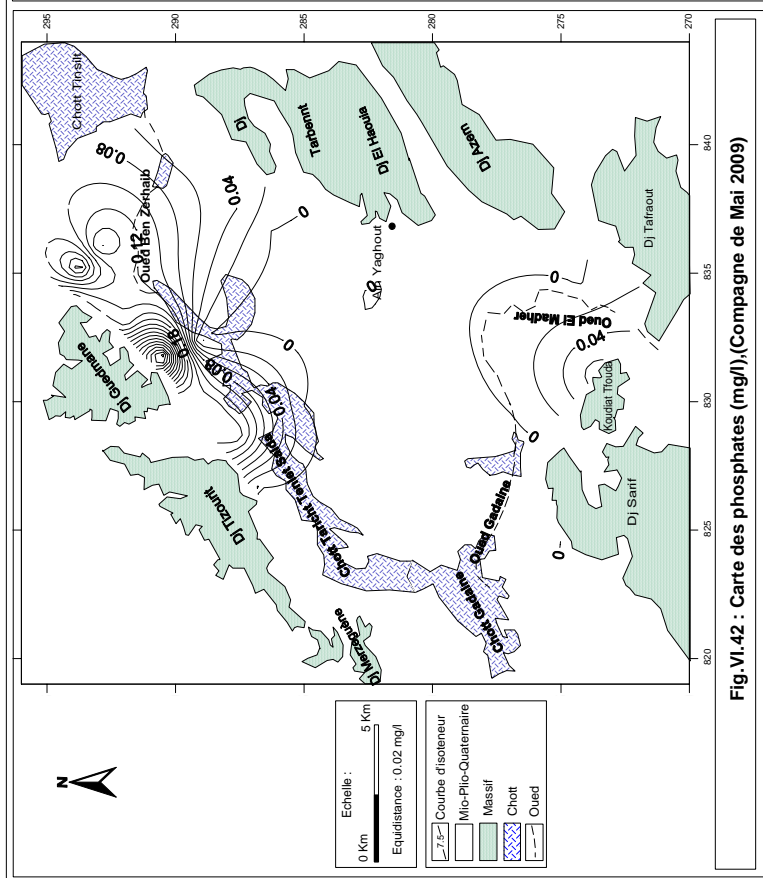
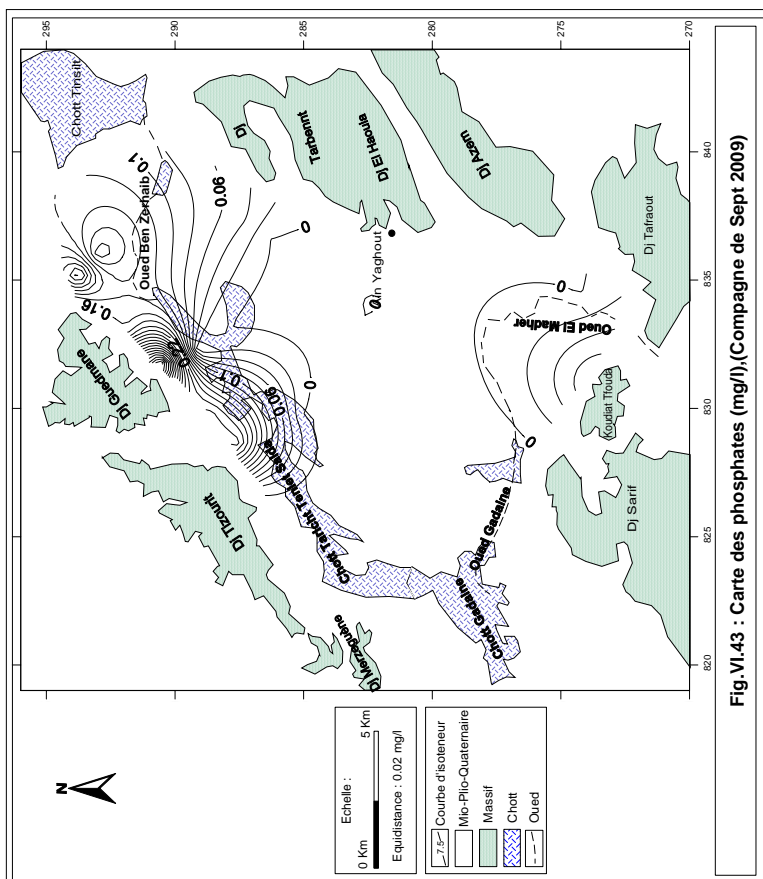
VI.7.4.2.4. Cartes des phosphates :

Les cartes (Fig.VI.42 et VI.43) montrent que les concentrations en phosphates dépassent les normes (0.4 mg/l) dans un seul puits situé à l'Est du Dj Guedmane où sa présence est probablement liée aux rejets urbains surtout ceux qui contiennent des détergents et à l'utilisation des engrais chimiques.









VI.8. Analyse en composantes principales (A.C.P) :

L'A.C.P est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'information contenue dans un tableau de données. Ce tableau est constitué en lignes par des « individus » (puits, forage,...) sur les quels sont mesurées des « variables quantitatives » (teneurs en Ca^{++} , Mg^{++} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Fe^{2+} , Zn^{2+} et Cu^{2+}) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières.

VI.8.1. Principe :

Dans un tableau comportant (P) variables quantitatives, les individus peuvent être représentés dans un « espace à P dimensions ». Pour des raisons de visualisation, les espaces retenus sont à une dimension (droites) et ce sera le cas le plus fréquent, ou à deux dimensions (plans). Les droites et les plans issus d'une A.C.P ne sont pas réalisés avec les variables initiales mais avec des « indices synthétiques » obtenus par combinaisons linéaires de ces variables initiales. Parmi tous les indices possibles, l'A.C.P recherche d'abord celui qui permet de voir au mieux les individus c'est-à-dire pour lequel la variance des individus est maximale. Cet indice est appelé première composante principale, ou encore premier axe principal. Une certaine proportion de la variation totale des individus est expliquée par cette composante principale. Ensuite une deuxième composante est recherchée, cette deuxième composante principale fournit la plus grande information possible complémentaire de la première. Le processus se déroule jusqu'à l'obtention de la dernière composante principale. Si la variable ou un individu joue un rôle particulier, on l'introduit dans l'A.C.P « variable à expliquer » ou « variable supplémentaire » (ne participe pas à la construction des axes).

VI.8.2. Résultats et interprétations :

Pour observer les individus, on construit les plans à partir des composantes principales les plus importantes et c'est le plan engendré par les axes 1 et 2, car par définition c'est le plan sur lequel le maximum d'information est visible. On examinera d'autres plans, selon la part d'information prise en compte par ces derniers. Les résultats de l'A.C.P sont influencés par l'ordre de grandeur des variables. Ainsi pour y remédier à cet inconvénient, il est recommandé de donner le même poids aux différentes variables en les réduisant. On réalise ainsi l'A.C.P soit sur des données centrées (variables de même nature) à partir de la « matrice des variances - covariances » entre variables, soit sur des données centrées réduites c'est-à-dire des variables de différentes natures « matrice de corrélations ».

Après l'élaboration des matrices des corrélations et de variances - covariances, il s'ensuit une diagonalisation basée sur :

- Une matrice de « vecteurs propres » qui contiennent des combinaisons linéaires des (P) variables initiales actives ;
- Une matrice de « valeurs propres » qui représentent les variances des individus sur les axes principaux correspondants.

Pour un axe donné, les variables qui ont les plus forts coefficients (en valeurs absolues) sont celles qui contribuent le plus à la formation de cet axe. Une variable est d'autant mieux représentée sur le plan qu'elle est proche du cercle. Le choix du nombre de composantes est exprimé en fonction des « valeurs propres » ou « les pourcentages de variation expliqués par chaque composante principale ».

Sur chaque plan retenu, on examine :

- La structure des variables à partir de leurs corrélations avec les axes principaux, représentée par des « cercles de corrélation » ;
- la répartition des individus, à partir de leurs coordonnées sur les axes principaux et d'indices.

VI.8.3. Application de l'A.C.P aux données chimiques (éléments majeurs) des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout:

Le type d'analyse effectuée est une A.C.P centrée réduite qui a été réalisée sur un tableau de données à 6 variables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, SO_4^{2-} , HCO_3^- et Cl^-) et à 50 échantillons prélevés de deux campagnes (Mai et Septembre 2009). L'interprétation de l'analyse se fera selon l'ordre des informations données par le logiciel (XLSTAT). Les résultats de cette A.C.P sont présentés en annexe V.

VI.8.3.1. Analyse statistique :

D'après le tableau VI.13, les ions : Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et Cl^- présentent un $C_v < 0,5$, pour le reste des variables ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$ et HCO_3^-) la dispersion est importante. $C_v > 0,5$

Tableau VI.13: Paramètres statistiques des éléments chimiques.

Eléments chimiques	Valeur Minimale (mg/l)	Valeur Maximale (mg/l)	Moyenne arithmétique	Ecart type	Coefficient de variation
Ca ²⁺	78,560	295,000	187,408	53,940	28,782
Mg ²⁺	69,980	264,380	139,666	50,250	35,978
Na ⁺ +K ⁺	66,000	1120,000	399,114	229,397	57,476
SO ₄ ⁻²	92,550	590,700	352,855	106,925	30,302
HCO ₃ ⁻	186,000	1871,000	402,140	317,183	78,873
Cl ⁻	225,910	1959,000	962,282	450,020	46,765

VI.8.3.2. Matrice de corrélation :

Le tableau VI.14 présente les différentes corrélations entre les variables deux à deux. Le coefficient de corrélation significatif d'après Mangin est $r = 0,51$ pour 50 couples de valeurs, ce qui permet de dégager les associations suivantes : Mg²⁺ - Cl⁻ : $r = 0.51$ et (Na⁺ + K⁺) - Cl⁻ : $r = 0.649$.

Tableau VI.14 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
Ca ²⁺	1					
Mg ²⁺	0,465	1				
Na ⁺ +K ⁺	0,237	0,373	1			
SO ₄ ⁻²	-0,363	-0,185	0,047	1		
HCO ₃ ⁻	0,046	0,312	0,417	0,117	1	
Cl ⁻	0,448	0,51	0,649	-0,202	0,288	1

VI.8.3.3. Etude des variables et des individus :

Le traitement a été poussé jusqu'à 2 facteurs. A ce stade seulement 66 % de la variance ont été exprimés. Les résultats sont résumés dans le tableau VI.15.

Tableau VI.15 : Pourcentage de variance exprimée.

Axe	F ₁	F ₂	% variance cumulée
% variance exprimée	43,28	22,77	66.05

Les figures VI.44 et VI.45 permettent de visualiser la projection des variables et des u.s. selon le plan F1 - F2.

Dans l'espace des variables, le facteur F₁ exprime 43.28 % de la variance. Ce facteur est déterminé par Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Cl⁻ et Na⁺+K⁺. Ceci nous permet de considérer le facteur F₁ comme facteur de minéralisation. Le second facteur F₂ exprime 22.77 % de la variance, il est déterminé par les sulfates donc celui de la contamination par les sulfates.

Dans l'espace des u.s (VI.45), une opposition s'observe entre les eaux minéralisées du groupe G₁ et les eaux moins chargées du groupe G₂. Le facteur F2 représente les eaux contaminées par les sulfates (G₃).

VI.8.4. Application de l'A.C.P aux données chimiques (éléments polluants) des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout :

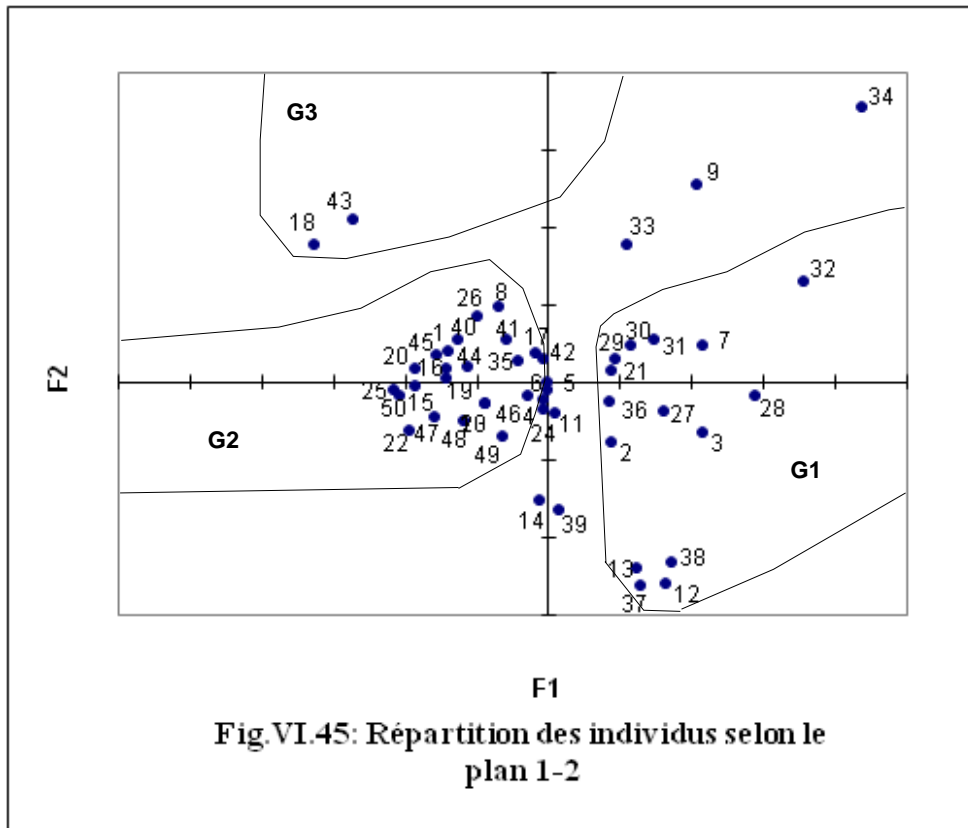
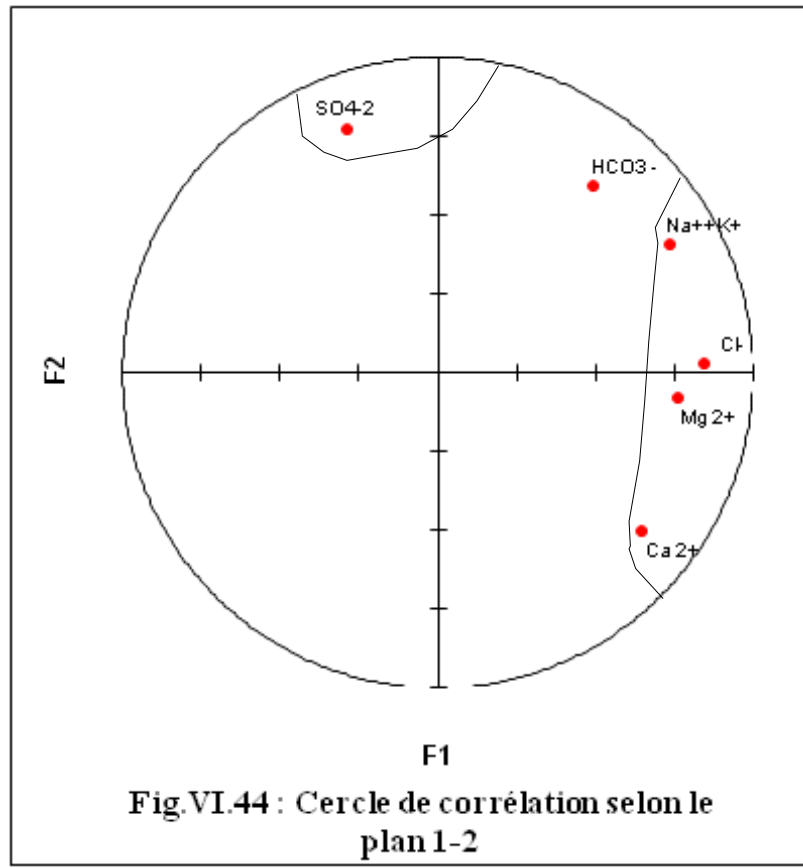
Notre tableau de données est formé par 7 variables chimiques (NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, Fe²⁺, Zn²⁺ et Cu²⁺) et 50 échantillons prélevés au niveau de deux compagnes (Mai et Septembre 2009). Les résultats de cette A.C.P sont présentés en (annexe VI).

VI.8.4.1. Analyse statistique :

D'après le tableau VI.16, tous les ions présentent un C_v > 0.5, donc ces ions obéissent à la même loi.

Tableau VI.16 : Paramètres statistiques des éléments polluants

Eléments chimiques	Valeur Minimale (mg/l)	Valeur Maximale (mg/l)	Moyenne arithmétique	Ecart type	Coefficient de variation
NO ₂ ⁻	0,000	0,410	0,049	0,091	185,162
NO ₃ ⁻	0,620	133,090	25,606	29,438	114,965
NH ₄ ⁺	0,000	1,030	0,213	0,312	146,415
PO ₄ ³⁻	0,000	0,511	0,073	0,115	158,033
Fe ²⁺	0,000	0,320	0,054	0,083	154,764
Cu ²⁺	0,000	2,120	0,548	0,540	98,515
Zn ²⁺	0,040	1,330	0,309	0,278	90,023



VI.8.4.2. Matrice de corrélation :

Le tableau VI.17 présente les différentes corrélations entre les variables deux à deux. Le coefficient de corrélation significatif d'après Mangin est $r = 0,51$ pour 50 couples de données. D'après ce tableau les corrélations entre les variables sont faible ($r < 0,51$).

Tableau VI.17 : Matrice de corrélation des éléments polluants.

Eléments chimiques	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Fe ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺
NO ₂ ⁻	1						
NO ₃ ⁻	0,038	1					
NH ₄ ⁺	0,275	0,456	1				
PO ₄ ³⁻	0,127	-0,198	0,385	1			
Fe ²⁺	0,157	0,291	-0,070	-0,166	1		
Cu ²⁺	-0,158	-0,058	-0,097	0,266	0,245	1	
Zn ²⁺	-0,230	0,109	0,135	0,150	-0,265	-0,008	1

VI.8.4.3. Etude des variables et des individus :

Le traitement a été poussé jusqu'à 3 facteurs et qui expriment 64.6 % d'informations (Tableau VI.18).

Tableau VI.18 : Pourcentage de variance exprimée

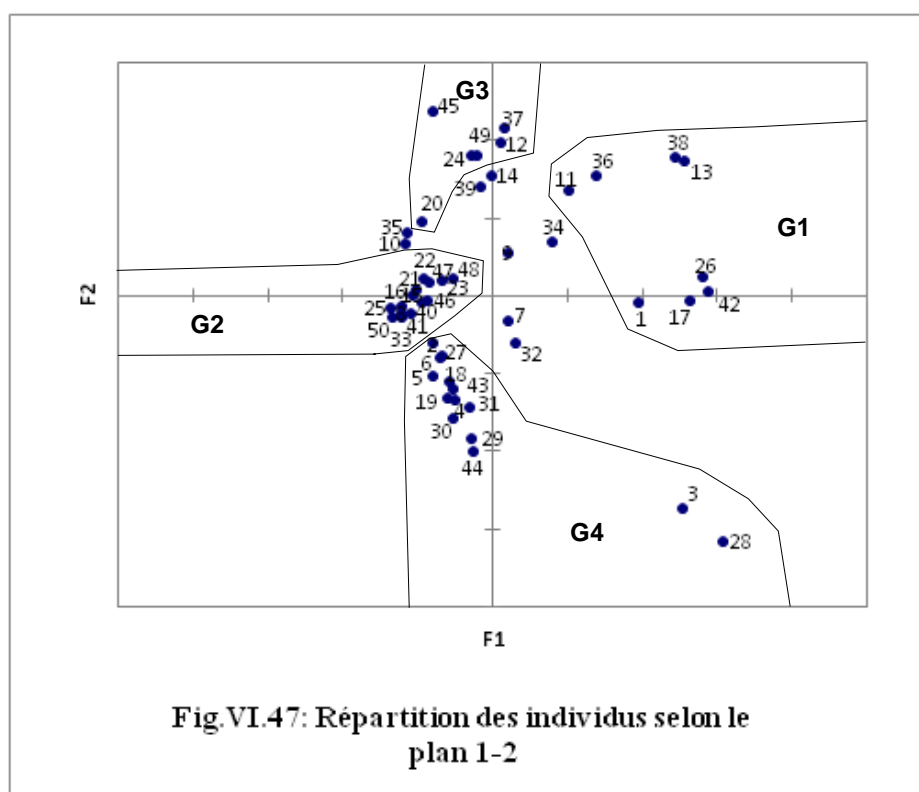
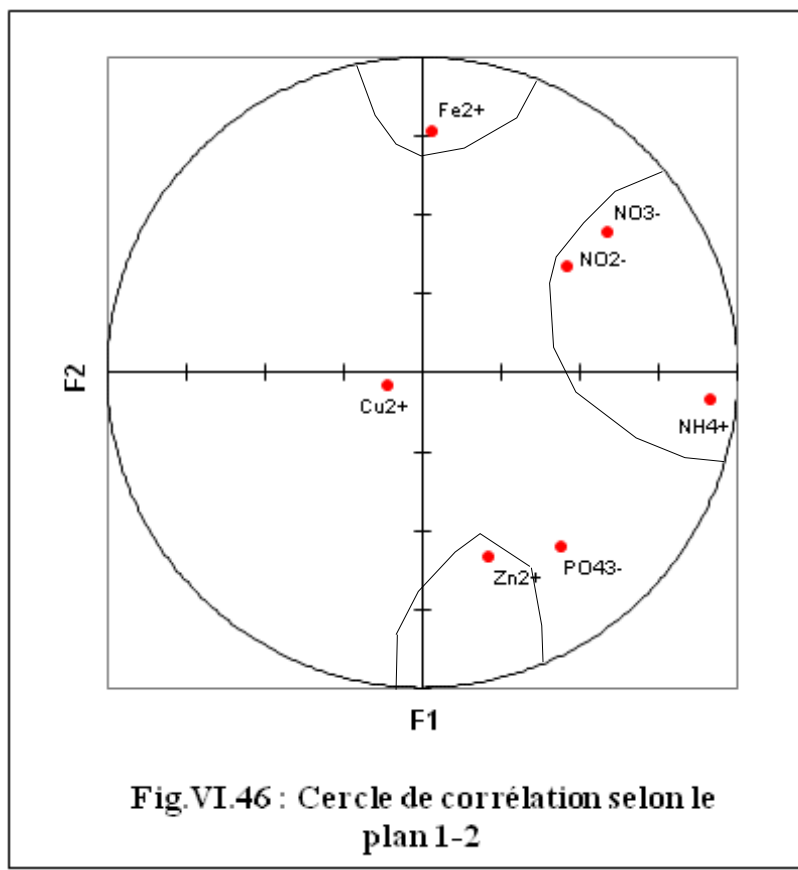
Axe	F ₁	F ₂	F ₃	% variance cumulée
% variance exprimée	23,69	22,20	18,65	64.54

L'examen des corrélations entre les variables et les axes principaux (annexe VI) permet de déterminer les structures des variables (Fig.VI.46) :

- ❖ Les variables NO₂⁻, NO₃⁻ et NH₄⁺ contribuent le plus à la formation de l'axe 1, avec une corrélation positive.
- ❖ Les variables Fe²⁺ et Zn²⁺ contribuent le plus à la formation de l'axe 2, et avec des corrélations déférentes.

On a une opposition entre la pollution par les nutriments et celle par les métaux lourds. Ces derniers forment 3 groupes avec une opposition entre le Fe²⁺ et Zn²⁺ alors que le Cu²⁺ n'est déterminé que par le troisième facteur.

Dans l'espace des individus, on est en présence de deux grandes oppositions (Fig.VI.47) :



- Selon l'axe F_1 il existe une opposition s'observe entre les eaux polluées par les éléments nutritifs du groupe G_1 et les eaux non polluées par ces éléments du groupe G_2 .
- Suivant l'axe F_2 l'opposition concerne les eaux polluées par le Fe^{2+} du groupe G_3 et les eaux polluées par le Zn^{2+} du groupe G_4 .

Conclusion :

L'interprétation des diagrammes de PIPER, SCHOELLER-BERKALOFF et la classification de STABLER a montré que les eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout sont caractérisées par une dominance des chlorures et des sulfates qui semble être liée à la nature géologique salifère.

L'analyse cartographique fait ressortir que le calcium, le magnésium et les bicarbonates ont des concentrations élevées à proximité des massifs. Cette augmentation est due à l'influence des formations carbonatées telles que les calcaires et les calcaires dolomitiques. Par contre les chlorures, les sulfates et le sodium sont caractérisés par des teneurs élevées à l'Est et au centre de la plaine, dues à l'influence des formations salifères comme le gypse et les marnes salifères, les argiles qui sont relativement salées.

La majorité des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout ont des teneurs supérieures aux normes fixées par l'O.M.S pour Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{++} et Mg^{++} . Ces eaux sont très dures, ce qui entraîne des inconvénients de cuisson et pour la lessive. Ces eaux ayant de très fortes minéralisations et peuvent entraîner des risques de salinisation des sols. L'étude statistique (A.C.P) nous a précisé la compétition des métaux lourds dans les eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout.

L'étude des éléments traces, montre que les eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout sont excessivement polluées par le zinc et le cuivre dans toute la plaine et par un degré moindre par les nitrates, les nitrites et l'ammonium et légèrement polluées par le fer et les phosphates.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude que nous avons entreprise dans la région de Gadaïne - Ain Yaghout, nous a permis de contribuer à la connaissance des paramètres hydrogéologiques et les principales sources de pollution. Les principaux résultats que nous avons obtenus peuvent se résumer ainsi :

- Du point de vue géomorphologique, la région d'étude est une cuvette d'effondrement entourée par des massifs dont l'axe de direction NE -SW de cette cuvette est occupé par des chotts. Elle est caractérisée par un réseau hydrographique peu dense et une végétation de type steppes à armoise et halophile.
- L'étude lithologique, tectonique et géophysique nous a permis de distinguer deux aquifères :
 - ◇ Le premier réservoir est constitué de conglomérats et de grés appartenant au Mio-Plio-Quaternaire ;
 - ◇ Le deuxième est constitué par des formations carbonatées du Crétacé et du Jurassique formant l'aquifère profond.
- La région étudiée est caractérisée par un climat semi-aride. Ainsi, les précipitations moyennes sont de l'ordre de 334 mm/an pour une température moyenne de 14.24 °C. L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle est de l'ordre de 317 mm, soit 95 % des précipitations. Le déficit agricole estimé est de 475 mm étalé sur la période allant de Mai jusqu'à Novembre.
- L'étude de la piézométrie de la plaine de Gadaïne - Ain Yaghout montre que l'aquifère superficiel est beaucoup plus alimenté par les massifs qui entourent la plaine et que l'écoulement souterrain converge vers chott Gadaïne et chott Tinsilt. Les valeurs du gradient hydraulique varient de (10^{-2}) à la limite NW de la plaine à (5.10^{-3}) dans la partie centrale.

Le bilan hydrogéologique montre que le stockage est de l'ordre de 1.4 hm³/an, ce qui explique le relèvement continu du niveau piézométrique de l'aquifère profond.

Le pompage d'essai, a permis de montrer que la transmissivité moyenne pour l'aquifère profond est de l'ordre de $2,4.10^{-1}$ m²/s.
- L'interprétation des diagrammes de PIPER, SCHOELLER-BERKALOFF et la classification de STABLER a montré que les eaux de la région de Gadaïne - Ain Yaghout sont caractérisées par une dominance des chlorures et des sulfates qui semble être liée à la nature géologique salifère.

L'analyse cartographique fait ressortir que le calcium, le magnésium et les bicarbonates ont des concentrations élevées à proximité des massifs. Cette augmentation est due à l'influence des formations carbonatées telles que les calcaires et les calcaires dolomitiques. Par contre les chlorures, les sulfates et le sodium sont caractérisés par des teneurs élevées à l'Est et au centre de la plaine, l'influence des formations salifères comme le gypse et les marnes, les argiles relativement salées.

La majorité des eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout ont des teneurs supérieures aux normes fixées par l'O.M.S pour Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{++} et Mg^{++} . Ces eaux sont très dures, ce qui entraîne des inconvénients de cuisson et pour la lessive. Ces eaux ayant de très fortes minéralisations et peuvent entraîner des risques de salinisation des sols. L'étude statistique (A.C.P) nous a précisé la compétition des métaux lourds dans les eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout.

L'étude des éléments traces, montre que les eaux de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout sont excessivement polluées par le zinc et le cuivre dans toute la plaine et par un degré moindre par les nitrates, les nitrites et l'ammonium et légèrement polluées par le fer et les phosphates.

En conclusion, nous espérons que l'étude hydrogéologique que nous avons menée au niveau de la plaine de Gadaïne - Ain Yaghout, en région semi-aride, a apporté un certain nombre d'informations et de précisions qui pourront orienter dans le futur la gestion de l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- AMROUNE A. (2008) : Hydrogéologie et qualité des eaux souterraines de la plaine de M'Sila (Zone Nord occidentale du bassin du Hodna, Algérie).
Mémoire de magister en hydraulique. Univ. Batna. 133 pages.
- ASTIER. J. L (1967) : Géophysique appliquée à l'hydrogéologie.
Ed. Masson et Cie. Paris, 277 pages.
- ASTIER. J. L (1967) : Programme de prospection géophysique pour l'étude hydrogéologique.
(Mission du 7 au 16 Juillet 1967) F.A.O.
- BELKHIRI. L. (2005) : Etude hydrogéologique et problème de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Ain Azel -Sétif- Est Algérien.
Mémoire de magister en hydraulique. Univ. Batna. 168 pages.
- BELLOULA L. (2004) : Contribution à l'étude hydrogéologique et modélisation de la plaine de Gadaïne – Ain Yaghout (Ouest de Batna).
Mémoire de magister en hydraulique. Univ. Batna. 132 pages.
- BENABDERRAHMANE. A. (1988) : Simulations numériques de la pollution saline d'un système aquifère dans une région semi-aride à aride – exemple des systèmes aquifères de la plaine de M'sila-(Hodna, Algérie).
Diplôme de Docteur ingénieur en géologie appliquée -UFR de Franche Comté- 185 pages.
- BENHAMZA. M, KHERICI. N (2007) : Contamination par les micropolluants métalliques des eaux souterraines de la zone mercurielle nord numidique (AZZABA), Nord Est Algérie.
2^{ème} colloque internationale sur l'eau et l'environnement.
- BESBES. M. (1978) : L'estimation des apports aux nappes souterraines par un modèle régionale d'infiltration efficace.
Thèse de doctorat. Univ. P. et M. CURIE – PARIS VI.
- BOULARAK M. (2003) : Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de Boumerzoug. Vulnérabilité des eaux souterraines et impact de la pollution sur la région d'Elkhroub.
Mémoire de magister en hydrogéologie. IST. Constantine. 177 pages.
- CAHIER DE l'A.B.H (Novembre 2000) : Bassins des hauts plateaux constantinois N°5 (Agence des bassins hydrographiques Constantinois – Seybouse – Mellegue) - Ministère des ressources en eau. Algérie.
- CASTANY G. (1963) : Traitement pratique des eaux souterraines.
Dunod édit. Paris. 661 pages.
- CASTANY G. (1982) : Principe et méthode de l'hydrogéologie.
Dunod édit. Paris. 236 pages.
- CASTANY G. (1966) : Interprétation des cartes piézométriques et caractéristiques des couches aquifères libres. *B.R.G.M, Bull. N°3.*
- C.G.G (1969) : Etude géophysique des hautes plaines constantinoises.
Agence Nationale des Ressources Hydriques de Constantine. Algérie.

- CHEBBAH L. (2004) : Etude hydrogéologique de la plaine de Zana – Chott Saboun (Ouest de Batna, Est Algérien).
Mémoire de magister en hydraulique. Univ. Batna. 160 pages.
- DEBIECHE T H. (2002) : Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. (Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien).
Thèse de docteur d'état. Univ. FRANCHE-COMTE. 199 pages.
- DJABRI L. (1996) : Pollution des eaux de la vallée de la Seybouse - régions Guelma - Bouchegouf - Annaba, ses origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines.
Thèse de docteur d'état. Univ. Annaba. 247 pages.
- D.H.W (Direction d'Hydraulique de la Wilaya de Batna)-Entreprise de forage et équipement (2003) :
Rapport de fin de sondage « Forage d'Ain Yaghout centre, Wilaya de Batna. Algérie », 16 pages.
- FOUCAULT A. ET RAOULT J.F (1980) : Dictionnaire de géologie.
Masson et Cie édit. Paris. 334 pages.
- GUASMI. I, DJABRI. L, HANI, A, LAMAROUX, C. (2006) : Pollution des eaux de l'oued Medjerda par les nutriments. Journal larhyss. Ed n°05.
- HALAWANI J. OMAR W. ET ALKADI F. (2004) : La gestion de la qualité des eaux à Tripoli (Liban).
Journal larhyss édition n°03.
- KHEMOUDJ K. (2001) : Impact de la pollution industrielle, urbaine et agricole sur les eaux de la nappe superficielle de la région d'El Eulma (Ouest de Sétif).
Mémoire de magister en hydrogéologie. Univ. Annaba. 195 pages.
- MANIA J. EL ACHHEB A. ET MURDY J. (2001): Processus de salinisation des eaux souterraines dans le sahel - Doukkala (Maroc occidental).
First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers-Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- MEGUELLATI S. (2005) : Etude hydrogéologique de la plaine de Boumia (Ouest de Batna, Est Algérien).
Mémoire de magister en hydraulique. Univ. Batna. 109 pages.
- MENNANI M. (1991) : Etude hydrogéologique de la plaine d'El Madher (Ouest de Batna, Est Algérien).
Thèse de doctorat. Univ de Nancy I.G.E.S. Paris. 400 pages.
- MENNANI M, KHEDIDJA A, CHERIET M ET BENCER S. (2004) : Etude du cycle global: Rejets, Contamination et Prélèvements auxquels sont soumis les champs captants des plaines d'El Madher et Gadaïne destinés à l'AEP de la ville de Batna.
Projet de recherche. Univ. Batna. 26 pages.
- MESSAOUD N. (1987) : Hydrogéologie et pollution des eaux. Exemple du bassin versant du Mazafran Mitidja (Algérie).
Thèse de doctorat. Univ. Ing. Scien. Techn. Et médicale de Grenoble.

- NEZLI E, ACHOUR. S, DJABRI. L. (2007) : Approche géochimique des processus d'acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la base vallée de l'oued M'ya (Ouargla). Journal Larhyss. Ed n°06.
- O. N. M d'Oum El Bouaghi : Données climatologiques de la station d'Ain Yaghout. Algérie.
- O. N. M de Batna : Données climatologiques de la station d'Ain Skhouana. Algérie.
- ROCHE M. (1963) : Hydrologie de surface.
Gautier - Villars Paris. 430 pages.
- RODIER J. (1996) : Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduelles, eau de mer.
Dunod édit. Paris. 1383 pages.
- R.S.AYERS et D.W.WESTCOT. (1988) : La qualité de l'eau en agriculture et l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- SAIBI H. (2003) : Analyse qualitative des ressources en eaux de la vallée du Souf et impact sur l'environnement, région aride à semi - aride d'El Oued.
Mémoire de magister en hydrogéologie. IST. USTHB. 165 pages.
- SARI AHMED. A (2002) : Initiation à l'hydrologie de surface.
Ed. Houma. Alger. Réf : 5/080.
- SELTZER P. (1964) : Le climat de l'Algérie.
Institut de météorologie. Univ. D'Alger. 36 pages.
- SEMAR A. (1995) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Beni Slimane (Wilaya de Médéa) Algérie.
Mémoire de magister en hydrogéologie. IST. USTHB. 298 pages.
- VILA J. M. (1977) : Notices explicatives des cartes géologiques 1/50 000 d'Ain Yaghout et d'El Madher. Ministère de l'énergie. Algérie.
- VILA J. M. (1980) : La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens.
Thèse de doctorat es-sc. Nat. Paris VI. 665 pages.
- World Health Organization (2008) : Guidelines for drinking-water quality.
Third edition incorporating the first and second Addenda.
Volume 1 : Recommendations, Geneva. 515 pages.
- ZOUITA N. (2002) : Etude de la pollution de l'aquifère alluvionnaire de la plaine d'El Madher (Nord Est Algérien).
Mémoire de magister en hydraulique. Univ. Batna. 100 pages.
- ✓ A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydriques (1993) : Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord (1922/60 – 1969/89) au 1/500 000.
Ministère des ressources en eau. Algérie.
- ✓ I.G.N : Institut Géographique National (1955) : Carte topographique d'Ain Yaghout au 1/50 000.
Ministère de l'énergie. Algérie.
Feuille n°: 146.

- ✓ I.G.N : Institut Géographique National (1955) : Carte topographique d'Ain El Ksar au 1/50 000.
Ministère de l'énergie. Algérie.
Feuille n°: 173.
- ✓ I.G.N : Institut Géographique National (1962) : Carte topographique de Constantine au 1/200 000.
Ministère de l'énergie. Algérie.
Feuille n°: P-Q, 3-4.
- ✓ I.G.N : Institut Géographique National (1964) : Carte topographique de Khenchela au 1/200 000.
Ministère de l'énergie. Algérie.
Feuille n°: P-Q, 5-6.
- ✓ I.G.N : Institut Géographique National (1977) : Carte géologique d'Ain Yaghout au 1/50 000.
Ministère de l'énergie. Algérie.
Feuille n°: 146.
- ✓ I.G.N : Institut Géographique National (1977) : Carte géologique d'Ain El Ksar au 1/50 000.
Ministère de l'énergie. Algérie.
Feuille n°: 173.

ANNEXES

Annexe I

Sondage : Ain Yaghout F54

Carte : AinYaghout 1/50000

Date de travaux : du 14.08.68 au 17.10.68

Echelle de la coupe : 1/2000

X : 833.740

Y : 284.500

Z : 829.500

Profondeur et cotes	Tubage et cimentation	Plan d'eau	Coupe	Description géologique	Etage
0					
20	17"3/4 Tube plein Ø12"			Argile brune et debris calcaires	MIO - PLOCENE
40				Calcaires cryptocristallins gris fissurés	
60				Argile avec intercalations de calcaire	
80				Calcaires cryptocristallins fissurés	
100	11"3/4 Tube plein Ø6"			Marne faiblement fissuré	CRETACE SUPERIEUR
120				Calcaire argileux	
140					
160					
180				Marne avec intercalations de calcaire	
200					
220					
240					
260				Calcaire fissuré	
280				Alternance de marne et de calcaire	
300	7"3/4 Ø127 mm			Calcaire avec intercalations de marne	CRETACE INFERIEUR - APTIEN
320				Alternance de marne et de calcaire	
340					
360				Calcaire dolomitique	
380	5"3/4 Ø108 mm				
400					
420					

Sondage : GADAIN TAKLILT (G1)

Carte : AinYaghout 1/50000

Date de travaux : du 21.02.70 au 11.09.70

X : 821.550

Y : 283.900

Z : 810.000

Profondeur et cotes	Tubage et cimentation	Plan d'eau	Coupe	Description géologique	Etage
0					JURASSIQUE SUPERIEUR ?
20	22" 1/4 Tube plein	-539		Marne beige à verdatre	
40	Ø16"			Galets calcaires gris beige	
60				Galets calcaires avec argile rouge	
80		-70		Marnes brunes avec pastilles vertes	
100	86 m			Marne brunes tent verdatres	
120				Calcaire dolomitique	
140				Calcaire dolomitique (avec pastilles de marnes vertes rares)	
160	12" 1/4			Zone broyée (Faille)	
180				Calcaire dolomitique avec intercalations de marnes brunes	
200				Calcaire dolomitique	
220				Calcaire dolomitique	
240				Calcaire dolomitique	
260	250 m			Calcaire dolomitique	

Sondage : GADAIN (G2)

Carte : AinYaghout 1/50000

Date de travaux : du 10.03.82 au 15.07.82

Echelle de la coupe : 1/2000

X : 821.400

Y : 281.400

Profondeur et cotes	Tubage et cimentation	Plan d'eau	Coupe	Description géologique	Etage
0		NS: 4.45 m			
20	Tube plein			Limon jaune carbonaté	
40	Ø26" / Ø18"5/8			Limon gris jaune sableux a gros galets	
60				Argile grise avec des couches de galets	
80	86 m			Argile grise jaune sableuse	
100				Argile avec intercalation des argiles sableuses comprendront des galets	
120	Tube plein				
140	Ø17 1/2 / Ø13"3/8			Argile sableuse avec des graviers et gros galets irreguliers	
160					
180				Graviers avec argile	
200	Tube plein Ø 9"5/2	83 m		Calcaire dolomitisé	
220	Ø11" 3/4			Calcaire dolomitisé gris dur	
240	Ø9 3/4			Calcaire dolomitisé fissuré	
260					
280	Ø7 3/4			Calcaire	
300	294 m	294 m			

Sondage : HENCHIR CEDRA (H1)

Carte : AinYaghout 1/50000

Date de travaux : du 16.05.89 au 01.07.89

Echelle de la coupe : 1/1000

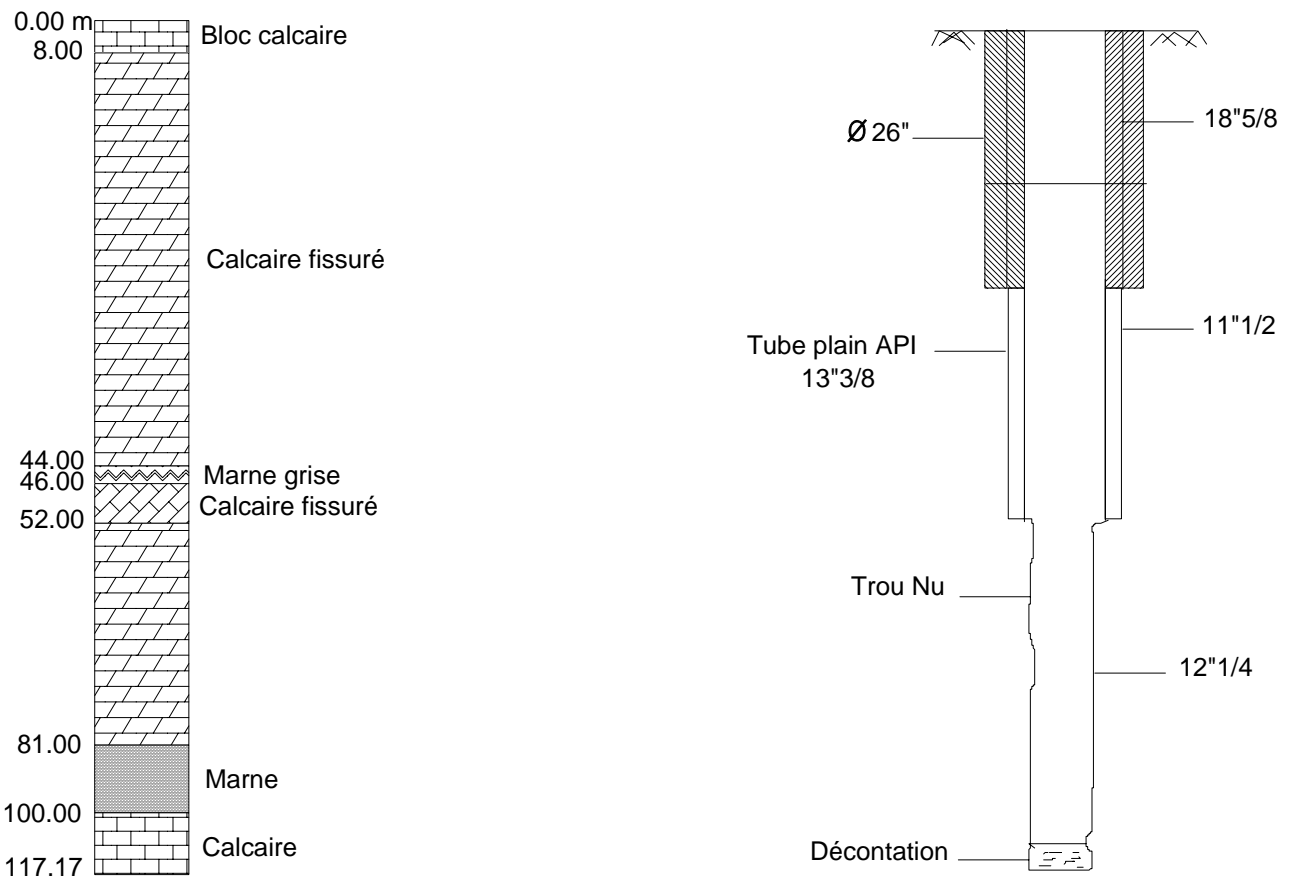
X : 831.400

Y : 282.600

Z : 824.000

Profondeur et cotes	Tubage et cimentation	Coupe	Description géologique	Etage
0	← Ø26" →			
10			Argile rouge avec peu de graviers	
20				
30	TP		Graviers et sable Argile rouge Graviers et sable	
40	Ø17" 1/2 Ø13"3/8		Argile avec graviers et sable Argile rouge	
50	Tube Lanterné API Ø13"3/8		Graviers et galets	
60	TP			
70	Ø13"3/8		Argile rouge avec peu de graviers avec peu de gyps	
80	Tube Lanterné API Ø13"3/8		Graviers et galets	
90			Calcaire brun fissuré	
100			Calcaire gris fissuré	
110	Crépine Jahson Ø8"		Calcaire brun argileux	
120				

Forage d'Ain Yaghout centre : Coupe et lithologie



Annexe II

Résultats du pompage d'essais du forage Ain Yaghout centre (Descente).

X= 836 Km, Y= 282 Km

t (mn)	N.D (m)	S (m)
0	28.00	0.00
5	28.00	0.00
10	28.00	0.00
15	28.00	0.00
25	28.00	0.00
35	28.00	0.00
45	28.00	0.00
55	28,01	0,01
70	28,01	0,01
85	28,02	0,02
100	28,02	0,02
115	28,02	0,02
130	28,03	0,03
145	28,03	0,03
175	28,04	0,04
205	28,04	0,04
235	28,04	0,04
265	28,04	0,04
325	28,04	0,04
385	28,05	0,05
445	28,05	0,05
505	28,04	0,04
625	28,05	0,05
745	28,10	0,10
865	28,10	0,10
925	28,10	0,10
1045	28,10	0,10
1165	28,10	0,10

t (mn)	N.D (m)	S (m)
1285	28,12	0,12
1345	28,12	0,12
1465	28,12	0,12
1585	28,14	0,14
1705	28,14	0,14
1825	28,14	0,14
1945	28,14	0,14
2065	28,14	0,14
2185	28,15	0,15
2305	28,15	0,15
2415	28,16	0,16
2545	28,16	0,16
2665	28,19	0,19
2785	28,20	0,20
2905	28,20	0,20
3025	28,21	0,21
3145	28,21	0,21
3265	28,20	0,20
3385	28,21	0,21
3505	28,20	0,20
3625	28,22	0,22
3745	28,23	0,23
3865	28,24	0,24
3985	28,24	0,24
4105	28,25	0,25
4225	28,25	0,25
4345	28,25	0,25

t : Temps de pompage.

N.D : Niveau dynamique.

S : Rabattement.

Résultats du pompage d'essais du forage Ain Yaghout centre (Remontée).

t' (mn)	N.D (m)	t+t'/t' (mn)	Sr (m)
0	28,25	000,00	0,25
5	28,09	470,00	0,09
10	28,09	235,50	0,09
15	28,09	157,33	0,09
20	28,09	118,25	0,09
30	28,08	079,16	0,08
45	28,08	053,11	0,08
60	28,07	040,08	0,07
90	28,07	027,05	0,07
120	28,06	020,54	0,06
180	28,06	014,02	0,06
240	28,05	010,77	0,05
300	28,05	008,81	0,05
360	28,04	007,51	0,04
420	28,04	006,58	0,04
480	28,04	005,88	0,04
600	28,03	004,90	0,03
720	28,03	004,25	0,03
840	28,02	003,79	0,02
960	28,02	003,44	0,02
1080	28,01	003,17	0,01

t : Temps de pompage.

N.D : Niveau dynamique.

S : Rabattement.

Sr : Rabattement résiduel.

Annexe III

Classification du STABLER : Compagne de Mai 2009.

N° du point d'eau	Formules caractéristiques		Faciès chimiques
	r % Anions	r % Cations	
F ₃	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Na+K> Mg> Ca	Chloruré Sodique
F ₄₅	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Na+K> Mg> Ca	
F _{16, F_{24, F_{26, F_{28, F₃₅}}}}	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Na+K> Ca > Mg	
F _{11, F₁₄}	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Na+K> Ca > Mg	
P ₂₃	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Na+K> Mg> Ca	
F ₃₀	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Ca> Mg> Na+K	Chloruré Calcique
P _{7, P_{9, F_{20, P_{21, P₃₃}}}}	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Ca > Na+K> Mg	
P ₂₂	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Ca> Mg> Na+K	
P _{19, F_{13, F_{15,}}}	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Ca > Na+K> Mg	
P _{39, P_{44,}}	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Mg> Ca> Na+K	Sulfaté Magnésien
P ₄₂	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Mg> Na+K > Ca	
P ₃₉	SO ₄ > Cl> HCO ₃	Na+K> Ca > Mg	Sulfaté Sodique
P ₄₀	SO ₄ > Cl> HCO ₃	Mg> Ca> Na+K	Sulfaté Magnésien

Classification du STABLER : Compagne de Septembre 2009.

N° du point d'eau	Formules caractéristiques		Faciès chimiques
	r % Anions	r % Cations	
F ₃	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Na+K> Mg> Ca	Chloruré Sodique
F ₄₅	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Na+K> Mg> Ca	
F _{16, F_{24, F_{26, F_{28, F₃₅}}}}	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Na+K> Ca > Mg	
F _{11, F₁₄}	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Na+K> Ca > Mg	
P ₂₃	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Na+K> Mg> Ca	
F _{30, P₃₉}	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Ca> Mg> Na+K	Chloruré Calcique
P _{7, P_{9, F_{20, P_{21, P₃₃}}}}	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Ca > Na+K> Mg	
P ₂₂	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Ca> Mg> Na+K	
P _{19, F_{13, F_{15,}}}	Cl> HCO ₃ > SO ₄	Ca > Na+K> Mg	
P _{44,}	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Mg> Ca> Na+K	Sulfaté Magnésien
P ₄₂	Cl> SO ₄ > HCO ₃	Mg> Na+K > Ca	
P ₃₉	SO ₄ > Cl> HCO ₃	Na+K> Ca > Mg	Sulfaté Sodique
P ₄₀	SO ₄ > Cl> HCO ₃	Mg> Ca> Na+K	Sulfaté Magnésien

Annexe IV

Résultats de quelques paramètres hydrochimiques : Compagne de Mai 2009.

Points d'eau	T (°C)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	TAC (°F)	DHT (°F)	i.e.b	S.A.R	% Na
F.3	23,00	6,92	3420	38,36	075,75	-0,09	07,42	57,17
P.7	20,40	7,09	5310	29,50	118,44	0,27	08,08	53,82
P.9	16,50	7,23	6290	35,73	149,90	0,27	08,53	52,25
F.11	21,20	6,98	5150	34,42	092,68	0,12	10,28	62,547
F.13	22,00	6,88	4930	40,98	094,30	0,08	10,05	61,81
F.14	22,10	6,85	5500	37,70	089,49	0,08	12,06	66,55
F.15	20,00	6,74	7260	47,21	141,92	0,14	12,11	61,42
F.16	20,50	6,83	5910	31,14	079,85	-0,04	14,30	71,49
P.19	14,00	7,45	5310	152,45	125,89	-0,37	13,72	65,66
F.20	19,00	6,95	3770	32,78	083,73	0,05	07,36	55,76
P.21	14,30	7,34	4590	21,31	113,99	0,36	06,05	47,12
P.22	14,70	7,64	4640	18,03	142,64	0,63	03,22	29,85
P.23	17,00	7,07	4530	20,32	133,73	0,53	04,28	36,78
F.24	17,00	7,90	4360	17,37	101,57	0,46	04,63	41,93
F.26	24,00	6,96	2750	24,26	067,68	0,04	05,84	52,64
F.28	18,20	7,11	3800	22,45	074,92	0,06	07,94	58,86
F.30	18,70	7,09	3980	15,24	129,03	0,36	04,11	36,32
P.32	18,90	7,90	2860	18,68	048,79	-0,43	07,87	63,87
P.33	20,00	7,59	3360	19,34	080,51	0,12	05,97	51,09
F.35	19,80	6,97	2960	26,88	070,91	-0,04	05,55	50,85
P.39	17,50	6,93	3260	27,70	161,86	0,55	01,94	19,44
F.40	22,70	7,00	1941	28,68	089,84	0,55	00,94	13,57
P.42	24,00	6,71	2620	29,67	102,34	0,45	02,03	24,09
P.44	18,60	6,89	3270	26,39	126,60	0,66	01,46	17,04
F.45	21,50	6,98	2250	24,59	066,46	0,01	03,71	41,70

Résultats de quelques paramètres hydrochimiques : Compagne de Septembre 2009.

Points d'eau	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	TAC (°F)	DHT (°F)	i.e.b	S.A.R	% Na
F.3	23,20	6,98	3500	38,11	073,93	-0,08	07,59	58,02
P.7	21,00	7,20	5420	29,75	126,02	0,28	07,88	52,45
P.9	17,50	7,34	6450	36,06	151,93	0,30	08,46	51,89
F.11	22,00	7,09	5200	34,83	095,90	0,13	10,16	61,88
F.13	22,50	6,93	5040	41,39	103,95	0,15	09,62	59,65
F.14	22,90	6,80	5600	37,54	101,56	0,11	11,30	63,69
F.15	21,00	6,92	7310	47,54	145,63	0,16	11,98	60,86
F.16	21,00	6,97	6115	31,47	090,49	0,03	13,55	69,08
P.19	16,00	7,56	5510	153,36	150,25	-0,24	12,55	61,59
F.20	20,00	6,90	3810	30,90	089,44	0,05	07,09	54,04
P.21	16,50	7,44	4700	20,49	125,28	0,42	05,89	45,31
P.22	17,00	7,72	4660	18,85	146,81	0,61	03,21	29,47
P.23	18,00	7,35	4750	20,49	150,92	0,57	04,14	34,65
F.24	18,00	7,98	4410	17,13	108,32	0,46	04,51	40,52
F.26	23,00	7,18	2960	24,91	082,69	0,15	05,44	48,39
F.28	18,50	7,32	3960	21,96	083,92	0,15	07,65	56,61
F.30	18,90	7,47	4120	15,65	131,14	0,44	04,06	35,88
P.32	19,00	7,92	2869	19,26	049,32	-0,43	07,86	63,74
P.33	21,00	7,65	3370	19,67	082,53	0,13	05,87	50,35
F.35	20,00	7,28	3020	27,62	073,42	-0,02	05,47	50,06
P.39	17,90	6,99	3310	28,44	136,05	0,56	02,14	22,49
F.40	23,00	7,15	1980	29,50	091,27	0,54	00,97	13,92
P.42	24,00	6,82	2660	30,24	104,74	0,44	02,02	23,79
P.44	18,80	6,94	3280	26,55	125,32	0,66	01,48	17,30
F.45	20,00	7,05	2260	25,00	068,43	0,01	03,68	41,21

Annexe V

ETUDE DES VARIABLES.

Variables	Composantes principales			
	Axe 1		Axe 2	
Ca ⁺⁺	0.649	0,421	-0.504	0,254
Mg ⁺⁺	0.762	0,580	-0.083	0,006
Na ⁺ +K ⁺	0.740	0,447	0.403	0,162
SO ₄ ⁻⁻	-0.286	0,081	0.770	0,592
HCO ₃ ⁻	0.493	0,243	0.591	0,349
Cl ⁻	0.850	0,722	0.024	0,0005

1^{ère} colonne : Coordonnées des variables.

2^{ème} colonne : Corrélations au carré.

ETUDE DES INDIVIDUS

	N° Ech	Axe 1		Axe 2	
Compagne de Mai 2009	1	-1,376	0,783	0,390	0,063
	2	0,880	0,383	-0,793	0,311
	3	2,174	0,694	-0,662	0,064
	4	-0,068	0,004	-0,221	0,045
	5	-0,016	0,000	-0,117	0,015
	6	-0,016	0,000	-0,021	0,000
	7	2,159	0,572	0,469	0,027
	8	-0,675	0,110	0,967	0,226
	9	2,085	0,187	2,539	0,277
	10	-0,876	0,468	-0,284	0,049
	11	0,107	0,001	-0,399	0,019
	12	1,660	0,272	-2,609	0,671
	13	1,253	0,201	-2,412	0,743
	14	-0,103	0,003	-1,527	0,682
	15	-1,857	0,894	-0,049	0,001
	16	-1,413	0,832	0,157	0,010
	17	-0,169	0,007	0,354	0,029
	18	-3,259	0,735	1,769	0,216
	19	-1,421	0,735	0,036	0,000
	20	-1,852	0,943	0,158	0,007
	21	0,890	0,103	0,149	0,003
	22	-1,923	0,687	-0,644	0,077
	23	-0,858	0,434	-0,280	0,046
	24	-0,053	0,002	-0,347	0,071
	25	-2,138	0,881	-0,116	0,003
Compagne de Septembre 2009	26	-0,969	0,418	0,845	0,317
	27	1,613	0,694	-0,394	0,041
	28	2,879	0,823	-0,184	0,003
	29	0,942	0,298	0,283	0,027
	30	1,164	0,505	0,479	0,085
	31	1,492	0,440	0,533	0,056
	32	3,562	0,755	1,284	0,098
	33	1,116	0,146	1,776	0,369
	34	4,383	0,515	3,531	0,334
	35	-0,423	0,183	0,273	0,076
	36	0,873	0,087	-0,262	0,008
	37	1,307	0,191	-2,628	0,774
	38	1,732	0,348	-2,322	0,625
	39	0,149	0,006	-1,664	0,759
	40	-1,251	0,724	0,553	0,142
	41	-0,576	0,244	0,545	0,219
	42	-0,062	0,001	0,287	0,018
	43	-2,711	0,577	2,102	0,347
	44	-1,106	0,561	0,182	0,015
	45	-1,544	0,851	0,334	0,040
	46	-0,266	0,019	-0,175	0,008
	47	-1,589	0,651	-0,467	0,056
	48	-1,163	0,481	-0,514	0,094
	49	-0,637	0,130	-0,713	0,162
	50	-2,049	0,854	-0,192	0,008

1^{ère} colonne : coordonnées des observations.

2^{ème} colonne : cosinus carrés des observations.

Annexe VI

ETUDE DES VARIABLES.

Variables	Composantes principales					
	Axe 1		Axe 2		Axe 3	
NO_2^-	0.464	0,215	0.335	0,112	0.181	0,0329
NO_3^-	0.589	0,347	0.442	0,196	-0.320	0,1023
NH_4^+	0.917	0,841	-0.086	0,007	-0.025	0,0006
PO_4^{3-}	0.443	0,196	-0.552	0,305	0.594	0,3525
Fe^{2+}	0.035	0,001	0.765	0,586	0.350	0,1226
Cu^{2+}	-0.110	0,012	-0.045	0,002	0.780	0,6078
Zn^{2+}	0.212	0,045	-0.589	0,346	-0.295	0,0868

1^{ère} colonne : Coordonnées des variables.

2^{ème} colonne : Corrélations au carré.

ETUDE DES INDIVIDUS

	N° Ech	Axe 1		Axe 2		Axe 3	
Compagne de Mai 2009	1	1,951	0,393	-0,103	0,001	0,168	0,003
	2	-0,797	0,185	-0,630	0,115	1,176	0,402
	3	2,556	0,372	-2,748	0,430	1,160	0,077
	4	-0,594	0,143	-1,347	0,734	0,009	0,000
	5	-0,794	0,160	-1,062	0,287	1,208	0,372
	6	-0,659	0,194	-0,797	0,284	0,025	0,000
	7	0,226	0,013	-0,333	0,029	-0,531	0,074
	8	-1,201	0,553	-0,249	0,024	-0,739	0,209
	9	0,210	0,010	0,540	0,068	1,850	0,804
	10	-1,156	0,412	0,653	0,131	-0,613	0,116
	11	1,031	0,249	1,337	0,420	0,059	0,001
	12	0,123	0,002	1,943	0,503	-0,507	0,034
	13	2,568	0,604	1,710	0,268	-0,781	0,056
	14	-0,002	0,000	1,537	0,233	-0,166	0,003
	15	-1,058	0,363	-0,002	0,000	-1,059	0,363
	16	-1,211	0,704	-0,150	0,011	-0,398	0,076
	17	2,642	0,417	-0,082	0,000	-2,167	0,281
	18	-0,568	0,058	-1,130	0,229	-1,228	0,271
	19	-0,490	0,030	-1,369	0,234	-1,826	0,417
	20	-0,930	0,420	0,944	0,433	0,357	0,062
	21	-1,013	0,340	0,057	0,001	-0,803	0,214
	22	-0,903	0,320	0,212	0,018	-0,864	0,293
	23	-0,669	0,254	0,180	0,018	0,756	0,324
	24	-0,283	0,013	1,790	0,524	0,941	0,145
	25	-1,360	0,668	-0,171	0,011	-0,168	0,010
Compagne de Septembre 2009	26	2,818	0,372	0,221	0,002	0,466	0,010
	27	-0,688	0,118	-0,812	0,165	1,422	0,505
	28	3,085	0,388	-3,182	0,412	1,648	0,111
	29	-0,270	0,015	-1,851	0,724	0,540	0,062
	30	-0,512	0,027	-1,587	0,260	2,239	0,518
	31	-0,293	0,022	-1,447	0,546	0,805	0,169
	32	0,318	0,024	-0,632	0,096	-0,174	0,007
	33	-1,215	0,707	-0,298	0,042	-0,462	0,102
	34	0,817	0,082	0,678	0,057	2,366	0,691
	35	-1,134	0,366	0,784	0,175	-0,558	0,088
	36	1,401	0,346	1,526	0,411	-0,009	0,000
	37	0,167	0,003	2,153	0,513	-0,235	0,006
	38	2,456	0,589	1,774	0,307	-0,655	0,042
	39	-0,151	0,003	1,375	0,242	-0,236	0,007
	40	-0,944	0,326	-0,108	0,004	-1,182	0,511
	41	-1,072	0,596	-0,253	0,033	-0,745	0,288
	42	2,885	0,383	0,034	0,000	-2,105	0,204
	43	-0,510	0,043	-1,209	0,239	-1,320	0,285
	44	-0,245	0,004	-2,031	0,253	-2,169	0,289
	45	-0,777	0,052	2,363	0,479	1,237	0,131
	46	-0,869	0,405	-0,082	0,004	-0,655	0,230
	47	-0,843	0,369	0,161	0,013	-0,620	0,200
	48	-0,513	0,028	0,208	0,005	2,026	0,441
	49	-0,196	0,003	1,789	0,216	2,171	0,319
	50	-1,337	0,579	-0,303	0,030	0,348	0,039

1^{ère} colonne : coordonnées des observations.

2^{ème} colonne : cosinus carrés des observations.