



Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Magister
Sciences de la Terre
Option : Hydrogéologie

HYDROLOGIE ET HYDROCHIMIE DU SYNLINAL D'AFLOU (ATLAS SAHARIEN CENTRAL, ALGERIE)

Présenté et soutenu publiquement par :
Mlle GUENOUNE Kamilia

Devant le jury composé de :

M ^r MAHBOUBI Mahammad	Professeur	Université d'Oran 2	Président
M ^r STAMBOUL Madani	M.C.A.	Université de Laghouat	Encadreur
M ^r SAFA Aïssa	M.C.A.	Université d'Oran 2	Co-encadreur
M ^r MANSOUR Hamidi	Professeur	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2015

Résumé :

L'hydrogéochimie constitue un moyen d'investigation privilégié intervenant aussi bien dans l'identification des aquifères que la compréhension des règles régissant l'écoulement des eaux dans les nappes souterraines. Les objectifs fixés dans ce domaine au niveau du Djebel Amour sont trois ordres :

En premier lieu, il s'agit de fixer les caractères physico-chimiques des eaux en fonction de leur position dans les aquifères.

Partant de ces données et en fondant sur une analyse statistique multidimensionnelle, on cherche à établir les liens entre les eaux et les aquifères assurant leur conservation ou leur cheminement.

Nous retiendrons en particulier l'influence des minéraux évaporitiques largement disséminés à différents niveaux mais aussi et surtout celle des remontées des matériaux triasiques que nous avons pu observer en de nombreux points du Djebel Amour.

Le dernier point concerne l'évolution de la chimie des eaux et les agencements piézométriques.

Mots clés Hydrogéochimie - aquifères –analyse statistique –minéraux évaporitiques- caractéristiques physico-chimiques- évolution

« Hydrology and hydrochemistry of the synclinal of Aflou »

Abstract :

Hydrogeochemistry is a preferred means of investigation involved both in the identification of aquifers that understanding the rules governing the flow of water into groundwater. The objectives in this area at the Djebel Amour are threefold:

First, it is to set the physico-chemical characteristics of the water in function of their position in the aquifers.

Based on these data and based on multivariate statistical analysis, we seek to establish links between water and aquifers ensuring their preservation or path. Amongst these are the influence of evaporite minerals widely distributed at various levels but also and especially the ascent Triassic materials we have seen in many parts of Djebel Amour.

The last point concerns the evolution of the water chemistry and piezometric level.

Key words :Hydrogeochemistry- aquifers- statistical analysis- evaporite minerals- physico-chemical characteristics- evolution

"الهيدروولوجيا و الهيدرو كيمياء لحوض أفلو"

الملخص:

الهيدروجيو كيمياء هي الوسيلة المفضلة للتحقيق سواء في تحديد الطبقات الحاملة للمياه او فهم القواعد التي تنظم تدفق المياه الجوفية .

الأهداف المحددة في هذا المجال على مستوى جبل عمور هي ثلاثة:

أولا يتم تعيين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه على حسب توزيعها في الطبقات الحاملة لها .

المياه الجوفية

بناء على هذه المعطيات، واستنادا إلى التحليل الإحصائي متعدد المتغيرات، نسعى إلى إقامة روابط بين المياه الطبقات الحاملة لها التي تضمن حفاظها و مسارها ولا سيما نركز على تأثير المعادن المالحة المنتشرة في نطاق واسع على مختلف أجزاء من جبل عمور

والنقطة الأخيرة تتعلق بتطور كيمياء و مستويات المياه الجوفية

كلمات مفتاحية

هيدروجيو كيمياء - الطبقات الحاملة للمياه - التحليل الإحصائي -المعادن المالحة - الخصائص الفيزيائية والكيميائية - تطور

Remerciements

Je remercie Le Bon Dieu Le Tout Puissant de m'avoir guidé, aidé et donné la foi et le courage pour accomplir ce travail.

Au terme de ce travail je tiens à remercier ceux qui m'ont aidé à le réaliser en particulier :

*Monsieur **STAMBOUL Madani** pour m'avoir proposé ce sujet, pour ses conseils et son aide tout au long de la préparation de mon mémoire.*

*Je remercie Monsieur **SAFA Aissa**, Chef du Département des Sciences de la Terre de l'Université d'Oran, pour m'avoir orienté vers la thématique du sujet.*

*Je tiens également à remercier Monsieur **MAHMOHBI M'Hamad** qui m'a fait l'honneur de présider mon jury et Monsieur **MANSOUR Hamidi** ; Doyen de la Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et d'Aménagement du Territoire ; pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury.*

*Mes sentiments de gratitude sont adressés à Madame **SEBANE Abdia** et à Monsieur **FOUKRACHE Mohamed** pour leur encouragement et soutien moral et la bibliographie fournie.*

Je tiens à remercier le personnel des services qui m'ont aidé pour réaliser ce travail :

- *L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques d'Alger*
- *L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de Djelfa et particulièrement Mme **YOUNSI Djihad**.*
- *L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de M'sila surtout Mr **BOUZIANE Tahar**.*

*Sans oublier Mr **A.ADDA Hanifi**, Directeur de la production de l'H.P.O que je le remercie pour son aide.*

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents à qui je ne pourrais jamais les remercier assez, pour leur soutien moral et matériel, leur compréhension, leur tendresse, leurs amours et leurs sacrifices.

Mes frères et sœur ainsi que toute la famille maternelle et paternelle

Tout le corps enseignant, personnel administratif et pédagogique de l'Université

Tous mes camarades de la promotion

Sommaire

Remerciements

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

CHAPITRE 01 : Considérations générales

- I. Situation géographique de la région d'étude**
- II. Aperçu sur la géologie de l'Algérie**
- III. Historique des travaux**
- IV. Contexte géologique**
 - A. Analyse stratigraphique
 1. Le Trias
 2. Le Jurassique
 3. Le Crétacé
 4. Le Tertiaire continental
 5. Le Quaternaire
 - B. Analyse Structurale
 1. Contexte structural de l'Atlas saharien central
 2. Contexte structural de la région d'étude
 - 2.1 Dispositif structural
 - 2.2 La fracturation du synclinal d'Aflou

CHAPITRE 02 : Hydro-climatologie du synclinal d'Aflou

Partie 01 : Climatologie

Introduction

- I. Choix des stations**
- II. Conditions locales**
 1. Nébulosité
 2. Insolation
 3. Humidité relative
 4. Étude des vents
 5. Les phénomènes accidentels
 6. Les précipitations
 - 6.1 Variation de la pluviométrie annuelle
 - 6.2 Le coefficient pluviométrique
 - 6.3 Ajustement des précipitations à une loi statique
 - 6.4 Précipitations mensuelles
 - 6.5 Étude de la pluviométrie saisonnière
 - 6.6 Quotient pluviométrique
 7. Les températures
 - 7.1 Températures moyennes mensuelles
 8. Relation Température-Précipitation

- 8.1 Indice de Martonne
- 8.2 Diagramme ombro-thermique de Gaussen et Bagnouls
- 8.3 Diagramme ombrothermique d'Euverte
- 8.4 Indice pluviométrique de Moral
- 8.5 Comparaison des méthodes
- 9. Évaporation
- 10. Évapotranspiration
 - 10.1 Évapotranspiration potentielle ETP
 - 10.1.1 Formule de Thornthwaite
 - 10.1.2 Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des valeurs mesurée de l'évaporation par l'évaporomètre de Piche
 - 10.2 Évapotranspiration réelle ETR
 - 10.2.1 Formule de Turc
 - 10.2.2 Formule de Coutagne
 - 10.2.3 Méthode de Wundt
 - 10.2.4 Méthode de Verdeil
 - 10.2.5 Méthode de Thornthwaite
 - 10.3 Discussion des résultats
- 11. Bilan hydrologique
 - 11.1 ruissellement superficiel
 - 11.2 Infiltration

Partie 02 : Hydrologie

Introduction

I. Les différents bassins hydrographiques en Algérie

II. Présentation du site étudié

A. L'Oued Sebgag

- 1. Caractéristiques physiques
 - 1.1 La forme de bassin
 - 1.2 Les dimensions de rectangle équivalent
 - 1.3 Densité de drainage
- 2. Hydrométrie de la zone d'étude
 - 2.1 Variabilité des débits mesurés à la station
 - 2.2 les crues de l'oued Sebgag
 - 2.3 Distribution des débits moyens mensuels
 - 2.4 Courbe des débits classés
 - 2.5 Étude des courbes de récession
 - 2.6 Analyses corrélatoires
 - 2.6.1 Analyses simples
 - a) Chronique de pluie
 - b) Chronique de débit
 - 2.6.2 Analyse croisée

B. L'Oued Seklafa

- 1. Distribution des débits moyens mensuels
- 2. Les débits maxima mensuels

3. Les débits minima mensuels
4. Courbe des débits classés
5. Courbe de tarage
6. Analyse corrélatrice

Conclusion

CHAPITRE 03 : Hydrogéologie du synclinal d'Aflou

Introduction

- I. Les formations aquifères**
- II. Étude de la nappe du Barrémien-Aptien-Albien**
 1. Structure hydrogéologique
 2. Inventaire des points d'eau
 3. Piézométrie
 4. Interprétation de la carte piézométrique
 5. Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère
 - 5.1 Pompage d'essai forage AFIII
 - 5.2 Pompage d'essai forage AF II

III. Apport de la Géophysique

Introduction

1. Les coupes géoélectriques
2. Cartes en équirésistivités
3. Carte du mur du premier niveau résistant
4. Carte en épaisseur
5. Carte en résistance transversale

Conclusion

CHAPITRE 04: Hydrochimie du synclinal d'Aflou

Introduction

- I. Description sommaire des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines**
 1. Qualité des données
 2. Paramètres physiques
 - 2.1 Potentiel d'Hydrogène (pH)
 - 2.2 La conductivité électrique (CE)
 3. Les éléments majeurs
 - 3.1 Anions
 - 3.2 Cations
- II. Classification des eaux**
 1. Composition chimique
 2. Faciès chimiques
 - 2.1 Représentation graphique des faciès chimiques
 - 2.1.1 Diagramme de Piper
 - 2.1.2 Diagramme de Schoeller –Berkaloff
 - 2.2 Répartition des faciès chimiques

3. Dureté des eaux du synclinal d'Aflou
4. Qualité des eaux pour l'irrigation
- 4.1 Taux d'absorption du sodium
- 4.2 Classification de Wilcox

III. Cartographie hydrochimique

1. Le calcium (Ca^{2+})
2. Sodium (Na^+)
3. Les sulfates (SO_4^{2-})
4. Les chlorures (Cl^-)
5. Le magnésium (Mg^{2+})
6. Le potassium (K^+)
7. Les Bicarbonate (HCO_3^-)
8. Les Nitrates (NO_3^-)

IV. L'origine du chimisme des eaux souterraines

1. Faciès chimiques
2. Rapports caractéristiques
3. Évolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux prépondérants (évaporites et carbonates)
4. Mise en évidence des échanges de base
5. Analyse en composantes principales ACP
- 5.1 Principe
- 5.2 Interprétation
- 5.3 Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux souterraines du synclinal d'Aflou
- 5.3.1 Matrice de corrélation
- 5.3.2 Analyse de l'espace des variables et des individus

V. Effet de la pollution sur la qualité chimique des eaux

1. Alimentation en eau potable
2. Principales sources de pollution dans la région d'étude
- 2.1 Rejets d'eaux usées
- 2.2 L'agriculture
- 2.3 l'élevage
- 2.4 Les décharges
- 2.5 Cimetières
- 2.6 Les apports naturels
3. Degré de pollution dans les formations aquifères du synclinal d'Aflou
- 3.1 Domaine principal de réception de pollution
- 3.2 Terrains dans lesquels la pollution se propage rapidement
- 3.3 Terrains dans lesquels la pollution se propage de façon faible ou nulle

Conclusion

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexes

Résumé

Liste des figures

N°	Titre	Page
Premier chapitre : Considérations générales		
01	Situation géographique de la région étudiée (Google Earth)	02
02	Schéma structural des Chaînes alpines de la Méditerranée occidentale	05
03	Les différentes parties de l'Atlas Saharien en Algérie	07
04	Coupe structurale Nord-Sud de l'Algérie du Nord	08
05	Carte géologique de la région d'étude	09
06	Séries et formations du Jurassique supérieur de l'Atlas Saharien Central	10
07	Colonne stratigraphique synthétique de l'Atlas Saharien Central	14
08	localisation de coupe sur une photo satellite de la zone d'étude	16
09	Coupe sériée à travers les structures du Djebel Amour	17
10	Cadre structural du Nord de l'Algérie, montrant les principales structures de l'Atlas Saharien	19
Deuxième chapitre : Hydro-climatologie du synclinal d'Aflou		
11	Positionnement des stations pluviométriques	21
12	Répartition moyenne quotidienne de l'insolation	22
13	Courbe de l'humidité moyenne relative	23
14	Direction des vents à la station d'Aflou (1990-1999)	24
15	Variations des précipitations moyennes annuelles des six stations	28
16	Ajustement graphique des Précipitations moyennes annuelles à la loi normale	30-32
17	Précipitations mensuelles (1990-2011)	35
18	Régime saisonnier de précipitations Période 1990-2011	36
19	Variation mensuelle de température à la station d'Aflou	38
20	Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne	39
21	Diagramme ombrothermique de la station d'Aflou	40
22	Diagramme d'Euverte station d'Aflou	40
23	Courbe d'évaporation moyenne mensuelle	42
24	Évolution de l'ETP (mm) à l'aide des formules à la station d'Aflou	45
25	Abaque de Wundt	47
26	Abaque de VERDEIL	47
27	Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE Station d'Aflou (1990-2011)	49
28	Organisation des BV au Nord de l'Algérie	56
29	Situation des principaux Djebels et Oued dans la région d'Aflou	57
30	Carte de sous -bassin versant Sebgag-Berkana	58
31	Variabilité des débits de l'oued Sebgag	61
32	Histogramme des hauteurs de crues	62

33	Les débits caractéristiques de l'oued Sebgag (1966-1967)	63
34	Courbe des débits cumulés	65
35	Courbe de tarissement de l'oued Sebgag 1967	67
36	Classification des systèmes karstiques définie par A. Mangin (1975)	69
37	Corrélogramme pluie 1966-1967	70
38	Spectre de densité de variance –pluie (1966-1967)	70
39	Corrélogramme -débit (1966-1967)	71
40	Spectre de densité de variance (débit 1966-1967)	72
41	Corrélogramme croisé (Pluie-Débit : 1966-1967)	72
42	Chronique des débits moyens mensuels	73
43	Chronique des débits maxima mensuels	74
44	Chronique des débits minima mensuels	75
45	Courbe des fréquences cumulées des débits classés	76
46	Crue du 3 Octobre 1976	77
47	Crue du 7 Septembre 1980	78
48	Corrélogramme de l'Oued de Seklafa	79
Troisième chapitre : Hydrogéologie du synclinal d'Aflou		
49	Carte hydrogéologique	86
50	Sources de l'Oued Morra	84
51	Sources de Sebgag	85
52	Positionnement des points d'eau sélectionnés	88
53	Forage d'Oued Morra	90
54	Forage d'Aflou	90
55	Forage AFII	93
56	Forage AFIII	93
57	Forage d'El-Haoudh	94
58	Forage de Brida	94
59	Carte piézométrique de la région d'étude	95
60	la courbe de descente du forage AF III	98
61	courbe de remonté du forage AF III	98
62	courbe caractéristique du forage AFII	100
63	Représentation graphique $s=f(Q)$ et $s'=f(Q)$	100
64	courbe de remontée	101
65	Carte en équirésistivités en AB=400 m	105
66	Carte en équirésistivités en AB=1000 m	106
67	Carte en équirésistivités en AB=3000 m	107
68	Carte du mur	109
69	Carte en épaisseur	110
70	Carte de résistance transversale	111
Quatrième chapitre : Hydrochimie du synclinal d'Aflou		
71	Diagramme somme des anions en fonction des cations pour les points d'eau	114
72	Carte de la conductivité électrique du synclinal d'Aflou	115
73	Concentrations des anions des eaux	116
74	Concentrations des cations des eaux	117
75	Composition chimique des eaux	117
76	Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Piper	119

77	Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Schoeller -Berkaloff	120-126
78	Carte de répartition des facies chimiques dans le synclinal d'Aflou	127
79	Diagramme de classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R	129
80	Diagramme de classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de WILCOX	130
81	Carte d'isoteneurs en calcium du synclinal d'Aflou	131
82	Carte d'isoteneurs en sodium du synclinal d'Aflou	132
83	Carte d'isoteneurs en sulfates du synclinal d'Aflou	132
84	Carte d'isoteneurs en chlorures du synclinal d'Aflou	133
85	Carte d'isoteneurs en magnésium du synclinal d'Aflou	134
86	Carte d'isoteneurs en potassium du synclinal d'Aflou	135
87	Carte d'isoteneurs en bicarbonates du synclinal d'Aflou	135
88	Carte d'isoteneurs en nitrates du synclinal d'Aflou	136
89	La relation Ca/ Mg vs SO ₄ /HCO ₃	137
90	La relation Ca/Mg vs HCO ₃ /Cl	137
91	La relation Ca/Mg vs SO ₄ /Cl	137
92	Carte des isoteneurs en rCl /r HCO ₃	138
93	Évolution des Indices de saturation (gypse et anhydrite)	139
94	Évolution des Indices de saturation (calcite, dolomite et l'aragonite)	140
95	La relation entre (Ca+Mg-HCO ₃ -SO ₄) et (Na +K -Cl) dans les eaux du Barrémien-Aptien-Albien	141
96	Éléments chimiques les bien corrélés	144
97	Projection des variables selon le plan F1-F2	146
98	Projection des individus selon le plan F1-F2	146
99	Projection des variables selon le plan F1-F3	147
100	Projection des individus selon le plan F1-F3	147
101	Projection des variables selon le plan F2-F3	148
102	Projection des individus selon le plan F2-F3	148
103	Carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines	153

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
Deuxième chapitre : Hydro-climatologie du synclinal d'Aflou		
01	Coordonnées des stations pluviométriques	20
02	<i>Nébulosité à Aflou</i>	22
03	Insolation à Aflou	22
04	Humidité relative à Aflou	23
05	Vitesse de vent à Aflou	24
06	Direction des vents à la station d'Aflou (1990-1999)	24
07	Phénomènes accidentels à la station d'Aflou (1990-1999)	25
08	Précipitations moyennes annuelles des six stations	27
09	Valeurs du coefficient pluviométrique (1990-2011)	29
10	Calcul des paramètres statistiques des six stations	30
11	Valeurs de χ^2 tabulé et χ^2 calculé pour les six stations	33
12	Précipitations annuelles fréquentielles et périodes de retour des valeurs caractéristiques	34
13	Précipitations moyennes mensuelles période 1990-2011	35
14	Précipitations saisonnières (1990/2011)	36
15	Quotient pluviométrique (1990/2011)	37
16	Températures moyennes mensuelles et annuelles	37
17	Indice d'aridité mensuel (1990-2011)	39
18	Indices climatiques à la station d'Aflou	41
19	Moyennes mensuelles de l'évaporation (1990-2011)	42
20	Calcul de l'ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Aflou (1990-2011)	43
21	Valeur de λ en fonction de la température	44
22	Les valeurs l'ETP mesurées selon la formule de Bouchet à la station d'Aflou (1990-2011)	44
23	Évapotranspiration réelle (méthode de Turc)	46
24	Calcul des paramètres de la formule de Coutagne	46
25	Résultats de la méthode de Verdeil	46
26	Bilan hydrique d'après Thornthwaite à la station d'Aflou (1990-2011)	50
27	Valeurs de l'ETP et l'ETR obtenues par différentes méthodes	50
28	Valeurs de ruissellement superficiel Période (1990-2011)	51
29	L'infiltration par les différentes formules de la Station d'Aflou	52
30	Caractéristiques de la station hydrométrique de Gueltat Sidi Saad	54
31	Indice de compacité de sous - bassin versant	59
32	Largeur et longueur équivalente	60

33	Densité de drainage	60
34	liste des crues de l'Oued Sebgag	62
35	Débits moyens mensuels de l'Oued Sebgag	63
36	Fréquences des débits moyens journaliers	64
37	Principaux paramètres	68
38	Débits moyens mensuels	72
39	Débits maxima mensuels	73
40	Débits minima mensuels	74
41	Fréquences des débits moyens journaliers	75
42	Calcul du volume emmagasiné	78
Troisième chapitre : Hydrogéologie du synclinal d'Aflou		
43	Log hydrogéologique synthétique (in Stamboul 2005)	83
44	Caractéristiques du pompage d'essai AFIII	96-97
45	Résultats de la courbe de descente	97
46	Valeurs de transmissivité par les trois méthodes	99
47	Caractéristiques du pompage d'essai de forage AFII	99
48	Pertes de charge	99
49	Échelle de résistivité des formations	103
Quatrième chapitre : Hydrochimie du synclinal d'Aflou		
50	Résultats des analyses du pH des échantillons des eaux	114
51	Résultats des analyses des anions des eaux échantillonnées	116
52	Résultats des analyses des cations des eaux échantillonnées	116
53	Faciès chimiques des eaux selon la méthode de Schoeller –Berkaloff	118
54	Plage de valeurs du titre hydrotimétrique	128
55	Paramètres statistiques des indices de saturation	139
56	Matrice de corrélation des éléments chimique	142
57	Éléments chimiques les bien corrélables	143
58	Pourcentage de variance exprimée	145
59	Les forages d'alimentation en eau potable	149
60	Analyse physico-chimique de l'eau du rejet urbain	150
61	Engrais utilisés	151
62	Types d'élevage dans la commune d'Aflou	151

Liste des abréviations

A.C.P	Analyse en composantes principales
A.E.P	Alimentation en eau potable
A.N.R.H	Agence Nationale des Ressources Hydriques
BI	Balance Ionique
DBO5	Demande Biochimique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DDA	Direction Départementale de l'Agriculture
E.N.A.G.E.O	Entreprise Nationale de Géophysique
E.T.P	Évapotranspiration potentielle
E.T.R	Évapotranspiration réelle
Ex	Excédent.
I	Infiltration.
I.E.B	Indice d'échange de base
MES	Matières En Suspension
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
R	Ruissellement
R.F.U	Réserve facilement utilisable
SAR	Sodium Absorption Ratio
SI	Indice de saturation
STHYR	Société des Techniques Hydrauliques et Routières

Introduction générale

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué au laboratoire de l'eau et de l'Environnement de la faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers à l'Université d'Oran 2 Mohamed BENAHMED, dans le cadre de la post-graduation «Hydrologie et Hydrogéologie des zones arides et semi-arides » agréée sous le n° en 2011 sous la responsabilité de M. SAFA Aïssa.

Préambule :

Pour les régions semi-arides, les précipitations annuelles sont comprises entre 300 et 600mm et pour les régions arides, elles sont comprises entre 100 et 300mm. Par ailleurs, pour les régions qualifiées de désertiques, les précipitations sont inférieures à 100 mm. Globalement, dans l'ensemble de ces territoires, les pluies sont très irrégulières concentrées en hiver, alors que les étés sont longs chauds et secs. Toutefois les spécialistes reconnaissent que l'aridification s'accroît sous l'effet d'un mauvais aménagement, par l'homme, des ressources que la nature a mise à sa disposition" (Baumer, 1974 in Boulahouat 1993).

Les zones arides, ce sont des régions où les précipitations sont moindres que l'évapotranspiration au moins durant une période plus ou moins longue de l'année (ROBERT, 1996).

En Algérie, la zone aride représente près de 95% du territoire national dont 80% dans le domaine hyperaride (Halitim, 1988), L'un des grands problèmes liés aux zones arides et semi-arides est sans doute la salinité des eaux souterraines. C'est un des facteurs importants qui provoquent la dégradation de la qualité des eaux naturelles. Elle est souvent liée à la nature lithologique des roches réservoirs, à l'évaporation intense et au régime pluviométrique faible.

Problématique et démarche de l'étude

Dans le cadre de la préparation de ce mémoire de Magister, le présent travail a pour thème « Hydrologie et hydrochimie du synclinal d'Aflou », un travail qui a pour objectif de préciser les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et d'étudier l'influence des minéraux évaporitiques sur la minéralisation de ces eaux via des méthodes géochimiques et statistiques, il s'agit également de préciser l'évolution de la minéralisation avec la piézométrie.

Dans ce contexte, le travail consiste en une présentation des facteurs géographiques, une étude géologique et géophysique, une étude hydro-climatique et une interprétation hydrogéologique et particulièrement une étude hydrochimique basée sur l'analyse des échantillons.

C'est dans cette optique que ce thème a été élaboré dont le plan suivi est comme ceci:

- ❖ *Acquisition et dépouillement des données bibliographiques ; ayant un rapport avec les travaux réalisés auparavant dans la région et qui comporte toutes les données géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, hydro-climatologiques, hydrologiques et géophysiques.*
- ❖ *Établir un inventaire des points d'eaux ainsi que les équipements en place (stations hydrométriques et pluviométriques).*
- ❖ *Présentation de la zone d'étude, dans son environnement géographique et géologique.*
- ❖ *géométrie de l'aquifère le plus important dans la région « Barrémien-Aptien-Albien » sous un contexte géophysique.*
- ❖ *étude de l'aspect hydro climatologique*
- ❖ *l'identification des différents aquifères, l'étude du mode d'acquisition du chimisme et de l'évolution des éléments chimiques dans l'eau, et l'étude de la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution.*
- ❖ *Conclusion générale*

***Premier chapitre : Considérations
générales***

I. Situation géographique de la région d'étude :

Aflou est située au cœur du pays dans l'Atlas Saharien à 400 km au Sud d'Alger de coordonnées géographiques 34°E et 2°N.

Le synclinal d'Aflou localisé à environ 300 Kilomètres au Sud-Ouest d'Alger est situé à mi-distance entre les villes de Djelfa au Nord Est et El Bayadh au Sud-Ouest (Figure 01).

La zone d'étude d'une superficie 380 Km² est entourée par des reliefs montagneux, elle est limitée :

- ❖ Au Nord par Djebel Gourou (1706 m), Djebel Chebka (1483 m) et Djebel Sidi Okba (1707 m)
- ❖ Au Sud par Djebel Mzara (1482 m) et Djebel Bou Redim (1475m)
- ❖ À l'Est par Djebel Zlagh (1591 m)
- ❖ À l'Ouest par Djebel Oum El Gueddour (1650 m) et Djebel Lekdam (1432 m)

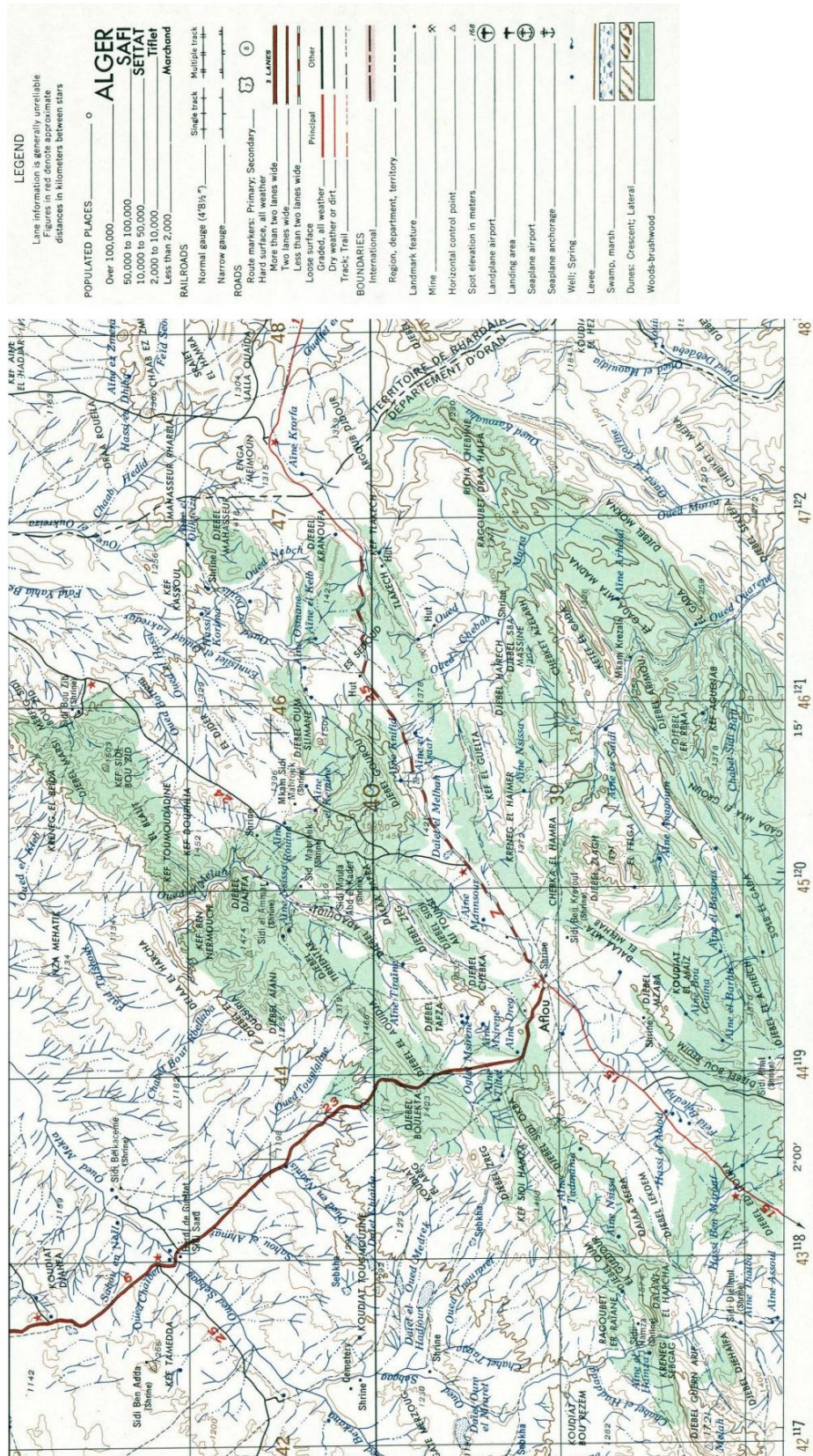


Figure 1 : Situation géographique de la région étudiée
 (Extrait de la carte topographique d'Afrou 1 : 250000 Edition 2-AMS)

II. Aperçu sur la géologie de l'Algérie :

L'Algérie, est un pays d'Afrique, est bordée au Nord par la Mer Méditerranée, à l'Est par la Tunisie et la Libye, au Sud-Est par le Niger, au Sud-Ouest par le Mali et la Mauritanie et à l'Ouest par le Maroc et le Sahara-Occidental.

D'un point de vue géologique, L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par l'accident sud-atlasique (figure 02) :

- ✚ **Un domaine septentrional ou Algérie du Nord** qui fait partie de la chaîne alpine, édifié au cours du Tertiaire et qui demeure encore instable aujourd'hui.
- ✚ **L'Algérie saharienne**, domaine relativement stable depuis la fin du Précambrien, constitué d'un socle déformé par les orogènes éburnéenne et panafricaine, d'une couverture paléozoïque généralement tabulaire affectée localement de plis hercyniens.

La frontière entre ces deux domaines est délimitée par l'accident Sud-atlasique qui suit le revers Sud de l'Atlas Saharien.

Deux chaînes montagneuses importantes, l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, séparent le pays en trois types de milieux qui se distinguent par leur relief et leur morphologie.

L'Algérie, en fonction de la géologie, de la lithologie et de la topographie, s'organise en trois grandes unités structurales : le Système Tellien, les Hautes Plaines steppiques et le Sahara.

i. Le Système Tellien :

C'est un ensemble constitué par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux, et de plaines.

Le Tell Occidental est ordonné en alignements alternés de massifs, de hauteur moyenne, dominés par une dorsale calcaire du Jurassique et du Crétacé et de dépressions représentées par les basses plaines oranaises et la plaine du Bas Chélif.

Le Tell Central est constitué par une chaîne de massifs prolongeant le Tell Occidental, où l'on retrouve les monts du Zaccar, de l'Atlas Blidéen et les massifs du Djurdjura dont l'altitude culmine à 2300 m. Les roches d'âge du Crétacé sont constituées de schiste, de marnes et de

calcaire marneux. La bordure littorale est dominée par une grande dépression formant la riche plaine alluviale de la Mitidja.

Le Tell Oriental représente la partie la plus montagneuse de l'Algérie. Il est disposé en chaînes parallèles et on distingue, du Nord au Sud :

- Les chaînes telliennes littorales, constituées de gneiss et de granite qui prolongent celles du Djurdjura. Ce sont les massifs de Collo, Skikda et de l'Edough bordant la basse plaine de Annaba et où se trouvent les deux plus grandes zones humides d'eau douce et le lac Tonga, inscrits comme réserve naturelle sur la liste de la Convention de Ramsar.
- Les chaînes telliennes externes, constituées par les monts des Babors et les massifs de Petite Kabylie et qui reposent sur des socles du Jurassique et de l'Eocène,
- Les chaînes telliennes internes dominées par les monts du Hodna, du Belezma, le massif des Aurès (2328 m d'altitude) et les monts des Nemenchas. Cet ensemble appartient au domaine atlasique.

ii. Les Hautes Plaines steppiques :

Localisées entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud, à des altitudes plus ou moins importantes de 900 à 1 200 m, elles sont parsemées de dépressions salées, chotts ou sebkhas qui sont des lacs continentaux formés au Pléistocène sous l'effet des pluies torrentielles et du ruissellement important qui en découle. On distingue deux grands ensembles :

- Les steppes occidentales, qui sont constituées des Hautes Plaines Sud Oranaises et Sud Algéroises, dont l'altitude décroît du Djebel Mzi à l'Ouest (1 200 m) à la dépression salée du Hodna au centre (11 000hectares) occupée par des dépôts détritiques
- Les steppes orientales à l'Est du Hodna, qui sont formées par les Hautes Plaines du Sud Constantinois où domine le Crétacé de nature calcaire et dolomitique. Ces Hautes Plaines sont bordées par le Massif des Aurès et des Némemchas.

iii. Le Sahara :

Le Sahara forme une large barrière qui sépare le domaine méditerranéen au Nord du domaine tropical au Sud. Il est constitué de plateaux (Hamadas et Tassili) où le massif volcanique du Hoggar culmine à 3 000 m d'altitude, de plaines (Regs et Ergs) et de dépressions (sebkhas et gueltas).

- Les hamadas et les tassilis sont d'immenses plateaux rocheux calcaires de forme tabulaire, à sols squelettiques dominant les vallées des oueds. Le Tassili des Ajers couvre 350 000 km².
- Les regs, surfaces horizontales de cailloux et de graviers de formes variées, résultent d'une importante érosion éolienne sur les horizons superficiels de sol.
- Les ergs sont des dépôts sableux qui se présentent sous forme de dunes. L'Erg Occidental long de 500 km et large de 150 à 250 km couvre une superficie de 100.000 Km² et fait partie des grands ensembles dunaires sahariens.
- Les dépressions sont soit salées (chotts et sebkhas) soit peu ou pas salées où s'accumulent les eaux de ruissellement (dayas).

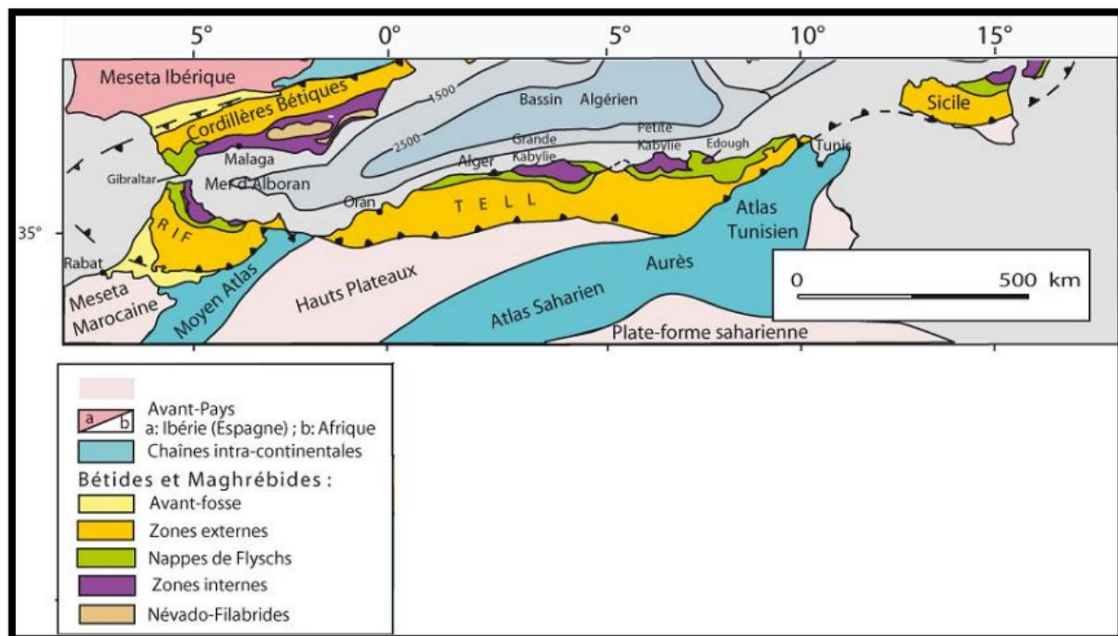


Figure 02 : Schéma structural des Chaînes alpines de la Méditerranée occidentale (d'après Chalouan et al., 2008)

III. Contexte géologique :

La région d'étude appartient au domaine septentrional et fait partie de l'Atlas Saharien qui est une chaîne intracontinentale formée au Tertiaire et constituant l'avant-pays déformé de la chaîne des Maghrébides.

L'Atlas Saharien, au sens large, est composé par les Monts des Ksour, le Djebel Amour et les Monts des Ouled Nail à l'Ouest, par les Zibans au centre et les Aurès à l'Est (Figure 03).

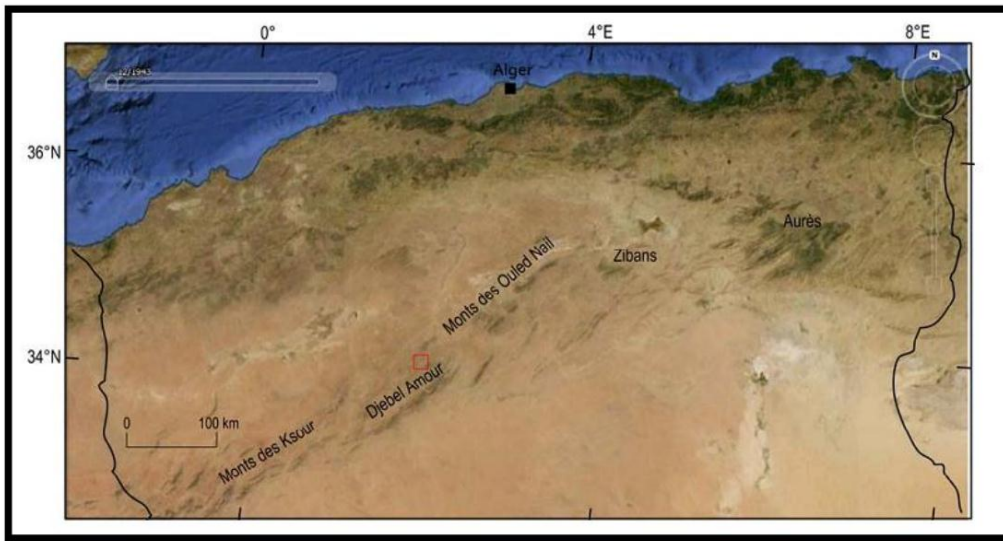


Figure03 : Les différentes parties de l'Atlas Saharien en Algérie.

(Carré rouge : région d'étude ; Google Earth)

Il s'agit d'une chaîne intracratonique d'âge Tertiaire orientée Nord Est-Sud Ouest, délimitée par deux lignes de fractures : l'accident Nord-atlasique et l'accident Sud-atlasique (Figure 04). L'orogénèse atlasique est l'héritage d'un sillon subsident à sédimentation mésozoïque.

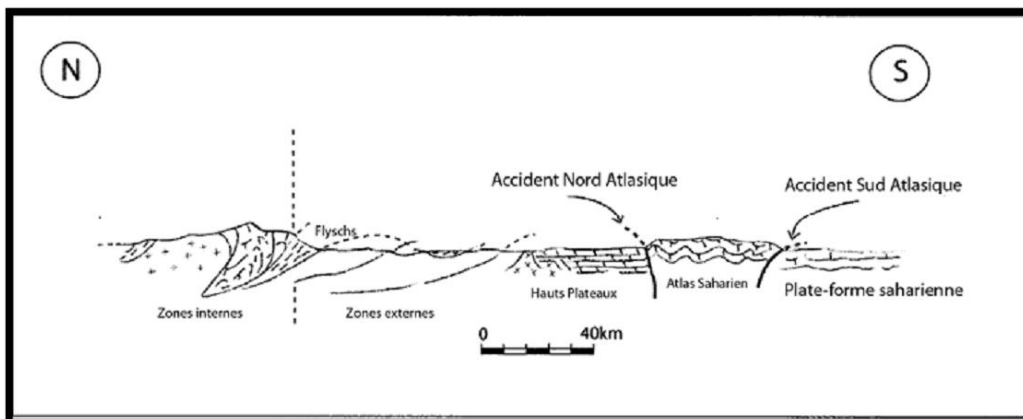


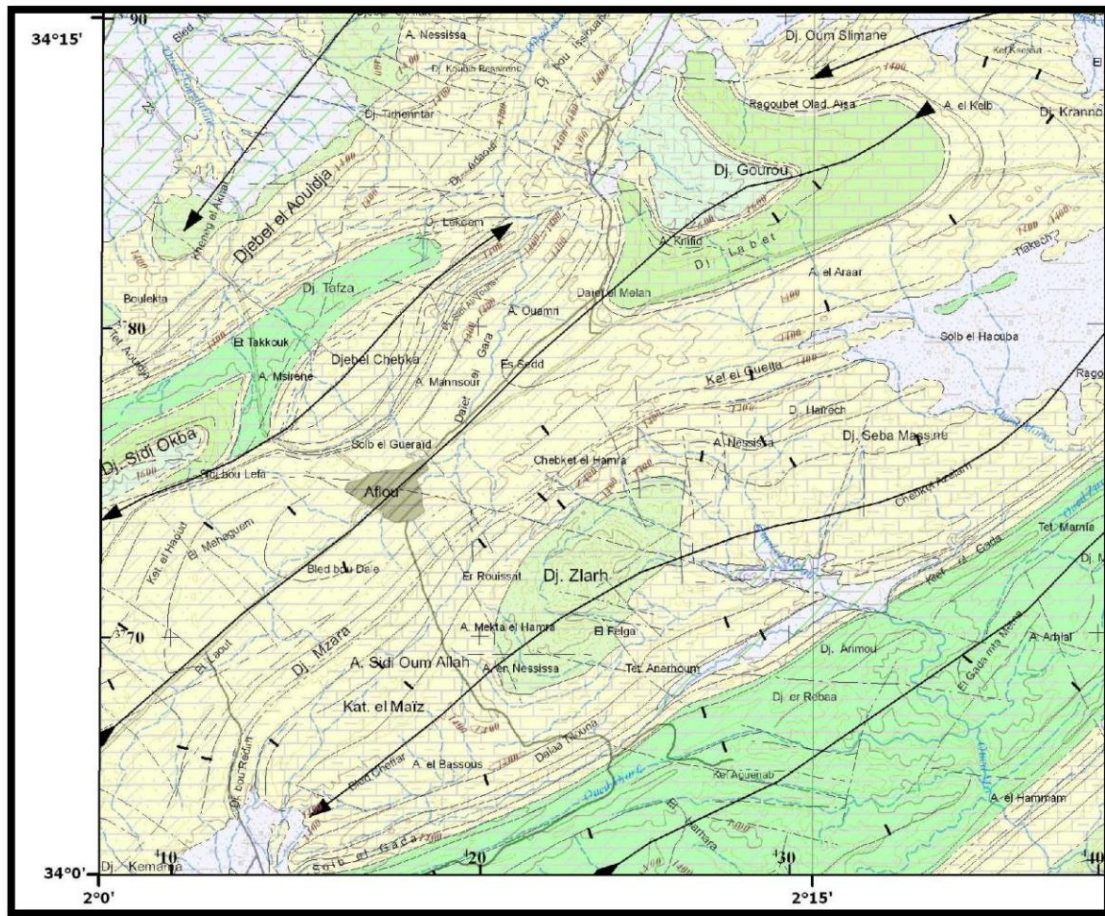
Figure 04 : Coupe structurale Nord-Sud de l'Algérie du Nord (Caire, 1971)

A. Analyse stratigraphique:

Les documents en notre possession ont permis de reconnaître la stratigraphie de la région :

- ✚ Des pointements de Trias diapiriques
- ✚ Le Jurassique inférieur et supérieur dans Djebel Zlarh et Djebel Chebka
- ✚ Le Crétacé inférieur et moyen qui forment le Synclinal d'Aflou
- ✚ Le Crétacé supérieur affleure dans Djebel Sidi Okba et Djebel Gourou.
- ✚ Les formations du Mio-Plio-Quaternaire qui se localisent dans le centre de la cuvette d'Aflou (figure 05).

Premier chapitre : Considérations générales



Légende des formations litho-stratigraphiques

Q ₄	Quaternaire (Holocène)
M.PI	Mio-Pliocène
K ₂ ²	Crétacé supérieur (Turonien)
K ₂ ¹	Crétacé supérieur (Cénomanién)
K ₁ ⁶	Crétacé inférieur (Albien)
K ₁ ⁵	Crétacé inférieur (Aptien)
K ₁ ^{3,4}	Crétacé inférieur (Hautérvien-Barrémien)
K ₁ ¹⁻³	Crétacé inférieur (Bernisien-Hautérvien)
J ₁ ³	Jurassique supérieur (Tithonien)
J ₁ ²⁻³	Jurassique supérieur (Kimmérgien-Tithonien)
J ₁ ²	Jurassique supérieur (Kimmérgien)
J ₁ ²	Jurassique supérieur (Kimmérgien)
J ₁ ^{1,2}	Jurassique supérieur (Kimmérgien)
J ₁ ¹	Jurassique supérieur (Oxfordien)
T	Trias

Légende des signes conventionnels

—	Limite géologique - déterminée
- - -	Limite géologique - supposée
—	Chevauchement ou contact normal - déterminé
- - -	Chevauchement ou contact normal - supposé
—	Faïlle déterminée
- - -	Faïlle supposée
—	Trace de stratification
⊥	Pendage de la couche
+	Verticalité
+	Horizontalité
↔	Anticlinale
↔	Synclinale

Figure 05 : Carte géologique du site étudié

(Extrait de la carte géologique au 1/200.000 d'Aflou, feuille NI 31-XV ; Edition ANRH 2008)

On distingue les formations suivantes:

1. Le Trias :

Dans la région, le Trias affleure sous forme de diapirs. Il est caractérisé par un mélange d'argiles, de marne parfois des grès. Ces formations sont de couleur brunâtres, violines ou versicolores intercalées de gypse ou d'halite présentant des intrusions de roches vertes. Ces formations apparaissent généralement en contact anormal avec des niveaux d'âges variés.

Au niveau de la région d'étude quelques pointements peuvent être cités :

- Le pointement d'Ain Fourene : situé sur la route d'Aflou –El Ghicha se trouvant enserré par l'anticlinal du Djebel chebka et Djebel Zlakh.
- Le pointement de Djebel Zlakh
- Le pointement de Gourou
- Le pointement de Taouila

2. Le Jurassique :

Les affleurements les plus anciens (en position normale) de l'Atlas Saharien central sont d'âge Jurassique supérieur et sont en général situés au cœur des anticlinaux très allongés. Ils appartiennent aux séries gréseuses d'El Bayadh et de Brézina et aux séries à prédominances argileuses de Laghouat et d'Ain Rich (figure 06).

2.1 Le Dogger (Série d'El Bayadh, 1000 à 1500 m d'épaisseur) :

a) **Le Bathonien** constitue l'affleurement le plus ancien de la région. Il correspond à "la formation des Argiles Silteuses d'El Aouidja" (ou série IA d'El Bayadh, 400 à 500 m d'épaisseur) (S.Abed, 1982).

b) **Le Callovo-Oxfordien** est représenté par :

-La formation dite Zone de Passage (ou série IB d'El Bayadh, 300 m d'épaisseur) constituée de combes argilo-silteuses où s'intercalent des bancs gréseux décimétriques; elle est délimitée à la base et au sommet par des barres gréseuses massives.

-La formation des Grès et Dolomies de Kerakda (Grès Inférieurs) (ou série IC d'El Bayadh, 900 m d'épaisseur au maximum) correspond à une formation de grès massifs à intercalations argileuses.

2.2 Le Malm :

a) Le Kimméridgien

- **Le Kimméridgien inférieur** (Série de Brézina, 500 à 1000 m d'épaisseur) est représenté par un ensemble marno-calcaire basal, un ensemble gréseux massif intermédiaire et un ensemble argilo-gréseux rouge supérieur.

-La formation de Calcaires à Polypiers d'El Azreg constitué par un ensemble marno-calcaire (Série IIA de Brézina, 300 m d'épaisseur).

-La formation dite Zone Intermédiaire est considérée comme une zone de transition entre les Calcaires à polypiers et les Grès Massifs sus-jacents (Série IIB de Brézina, 110 m d'épaisseur).

-La formation des Grès Massifs de Seklafa (Grès Supérieur), est constituée par des grès massifs intercalés de lits argileux peu épais (Série IIC de Brézina, 300 m d'épaisseur).

-La formation des Grès et Argiles Rouges de Kourdane : elle se caractérise par la teinte rouge de ses faciès détritiques constituée de barres de grès intercalées de niveaux argileux (Série IID de Brézina, 350 m d'épaisseur au maximum).

- **Le Kimméridgien supérieur** (Série de Laghouat, 900 m d'épaisseur) est représenté par un ensemble marno-calcaire très épais à la base et un ensemble gréseux au sommet. Ces formations constituent une combe bien visible dans le paysage où affleurent les formations essentiellement marno-calcaires et/ou gypseuses coiffées par l'épisode des Grès à chenaux de Taouïala. Le Kimméridgien supérieur se subdivise en deux sous séries:

-La sous série de Tadjmout (200 à 400 m d'épaisseur): composée par deux formations : (i) La formation des calcaires lumachelliques à la base constituée par une alternance de marnes grises et de calcaires bioclastiques à lamellibranches, surmontée par (ii) la formation des marnes à gypse inférieure au sommet constituée par des marnes à intercalations de bancs massifs de gypse.

-La sous série d'Aflou (300 m d'épaisseur) constituée par un ensemble marno-calcaire à la base subdivisé en deux formations : (i) La formation basale des calcaires massifs; (ii) La formation sommitale des calcaires en plaquettes ; et d'un ensemble argilo-gréseux sommital constitué d'une seule formation : la formation des grès à chenaux de Taouïala (200 m d'épaisseur) constituée par une alternance de barres gréseuses décamétriques et de couches d'argiles un plus épaisses.

- b) **Le Portlandien:** (Série d'Ain Rich, 250 m d'épaisseur) comporte deux formations :
- La formation des Marnes à gypse de Taouiala (50 à 200 m d'épaisseur) qui apparait sous forme d'une combe essentiellement marno-gypseuse qui affleure très mal.
 - La formation des Calcaires oolithiques du Zerga qui apparait sous forme d'une corniche qui domine les formations plus tendres appartenant aux séries inférieures. Elle est constituée par des bancs métriques de calcaires oolithiques séparés par de minces niveaux marneux ou marno-calcaires.

ÉPAISSEURS MOYENNES		FORMATIONS	SERIES	FAUNES ET FLORES CARACTERISTIQUES	AGES PROBABLES
250 m		B CALCAIRES OOLITHIQUES DU ZERGA A MAENES A GYPSE DE TAOUIALA	AIN RICH IV	CALPIONELLES	BERRIASIEN PORTLANDIEN
200 m		C GRES A CHENAUX DE TAOUIALA B CALCAIRES EN PLAQUETTES A CALCAIRES MASSIFS	LAGHOUAT III	Everticyclammina virguliana	KIMMERIDIEN SUPERIEUR
200 à 700 m	B MARNES A GYPSE A CALCAIRES LUMACHELLIQUES	Sous-série d'Aflou 2 Sous-série de Tadjemout 1			
200 m		D GRES ET ARGILES ROUGES DE KOURDANE	BREZINA II	Alveosepta Jaccordi Sowerbycera tortisulcatum	KIMMERIDIEN INFERIEUR
500 m	C GRES MASSIFS DE SEKLafa				
200 m	B ZONE INTERMEDIAIRE A CALCAIRE A POLYPIERS DE L'AZREG				
500 m		C GRES ET DOLOMIES DE KERAKDA	EL BAYADH I	Macrocephalites macrocephalus	OXFORDIEN CALLOVIEN
200 m	B ZONE DE PASSAGE				
500 m	A ARGILES SILTEUSES D'EL AOUIDJA				

Figure 06 : Séries et formations du Jurassique supérieur de l'Atlas Saharien Central.

(D'après S. Abed, 1982)

3. Le Crétacé

3.1 Le Crétacé inférieur: Il montre deux séries détritiques : Néocomien-Barrémien et Albien inférieur, séparées par l'intervalle carbonaté de l'Aptien.

- a) **Le Néocomien-Barrémien:** formation fluviatile représentée par une épaisse série continentale de grès grossiers à dragées de quartz (Grès à dragées Inférieurs) intercalés de minces niveaux argileux souvent rouges.

- b) **L'Aptien** : caractérisé par une formation carbonatée (20 à 30 m d'épaisseur) qui se présente comme une corniche formant un excellent repère géomorphologique.

Ce repère disparaît dans la série crétacée du Milok à Laghouat, où l'Aptien apparaît sous forme d'une combe argileuse (argiles vertes à gypses) avec intercalation de quelques bancs gréseux à géodes de gypse.

- c) **L'Albien** : qui comprend une formation inférieure fluviatile détritique de grès à dragées de quartz (Grès Supérieurs) à grandes stratifications obliques (Albien inférieur) et une formation supérieure essentiellement marneuse où s'intercalent des bancs calcaires fins, blancs, parfois dolomitiques à laminations algaires de type Stromatolithes (Albien supérieur).

3.2 Le Crétacé supérieur : est caractérisé par des dépôts de plate-forme carbonatée.

- a) **Le Cénomanién** : est composé de trois formations : (i) une formation marneuse gris noire intercalée de bancs calcaires ; (ii) une formation marneuse à gypse caractéristique du Cénomanién ; et (iii) des barres calcaires, plus ou moins dolomitisées, riches en bioclastes avec des nodules et lits de silex.
 - b) **Le Turonien** : (60 m d'épaisseur) composé de deux ensembles calcaires surmontés par une barre massive dolomitique.
 - c) **Le Sénonien** : (160 m d'épaisseur) est composé de trois ensembles : (i) un ensemble inférieur qui comprend des calcaires crayeux à silex ; (ii) un ensemble médian constitué de marnes gypseuses, admettant des intercalations de bancs de gypse, de calcaires dolomitiques ou de cargneules et (iii) un ensemble supérieur qui débute par une succession de bancs calcaires bioclastiques puis comprend des niveaux calcaires bréchiques.
4. **Le Tertiaire continental** : Il correspond aux terrains d'âge Eo-Oligocène essentiellement continentaux avec des argiles rouges, des grès et des conglomérats, dans lesquels s'intercalent des bancs de calcaires lacustres.
5. **Le Quaternaire**: Les terrains quaternaires couvrent une importante superficie dans l'Atlas Saharien au sens large, constitués principalement de dépôts alluviaux parfois très épais (plusieurs dizaines de mètres).

AGE	Puissance (m)	LOG	Description lithologique
TERTIAIRE CONTINENTAL	400		Argiles à gypses avec des conglomérats à la base
SENONIEN S.L	300		Intercalation de dolomie et argiles gypseuses
TURONIEN	70		Barre dolomitique
CENOMANIEN	100		Argiles à gypses
ALBIEN SUP.	60		Calcaire fin blanc
ALBIEN INF.	250		Grès à dragées supérieur "Formation de Machereb"
APTIEN	15-20		Barre calcaire intragrèseuse "Formation de Drabina"
BARREMIEN	850		Grès à dragées inférieur "Formation de Machereb"
NEOCOMIEN SUP.	160-230		Barre calcaire } "Formation de Tadmit supérieur" Marnes gypseuses }
NEOCOMIEN INF.	150-170		
PORTLANDIEN SUP.	150-200		Grès à chenaux "Formation de Tadmit inférieur"
PORTLANDIEN INF.	200-350		Marno-calcaires bleutés "Calcaires de Zeireg"
	50-130		Marnes gypseuses et calcaires lumachelliques "Membre de Tadjemout"
KIMMERIDGIEN	170		Marnes gypseuses et calcaires lumachelliques "membre de Tadjemout"
	200		
	500		Grès rouges à blanchâtres à intercalation d'argiles vertes à barre de calcaires dolomitiques "Formation Khaoula"
OXFORDIEN	100		Calcaires à polypiers "Membre Azreg"
	800		Grès inférieurs Argiles silteuses
DOGGER	300		Argile violine et roches vertes
TRIAS			

Figure 07 : Colonne stratigraphique synthétique de l'Atlas Saharien Central d'après I.A.P (1973).

B. Analyse Structurale:

1. Contexte structural de l'Atlas saharien central :

Avant d'atteindre la Plate-forme Saharienne, L'Atlas Saharien forme la dernière barrière qui a subi plusieurs phases de déformation au Méso-Cénozoïque, ayant abouti à la formation de structures tectoniques :

- Des anticlinaux souvent très allongés, généralement coffrés et faillés au cœur de direction SW-NE caractérisant l'Atlas. Ces failles ont mis à jour un Trias accompagné de roches vertes.

Les anticlinaux présentent des couches largement redressées.

- Des synclinaux typiques des formations où ils sont établis dans les grés du Barrémien et de l'Albien, ce sont des systèmes larges à fonds plats et à flancs redressés parfois jusqu'à la verticale et très fracturés.

Généralement, les synclinaux sont remplis de grés du Barrémien, quant aux synclinaux perchés de Gourou, Sidi Okba et Oum El Guedour, ils sont formés exclusivement de calcaire aptien ,de grés Albien et de marne gypseuse du Cénomaniens et le tout est surmonté par des calcaires dolomitiques Turoniens.

- Des plis qui présentent de rapides ennoyages axiaux et se relayant pour donner la structure en « Chenille processionnaires » définie par E.Ritter (1902).

2. Contexte structural de la région d'étude :

2.1 Dispositif structural :

La zone d'étude fait partie du Djebel Amour dont les montagnes forment un nœud orographique de premier ordre et constituent une vaste amygdale de plis assez individualisés (selon E.Ritter1902) et enserrent une large cuvette synclinale d'Aflou.

Le plus souvent les synclinaux se trouvent à une altitude supérieure à celle des charnières des anticlinaux voisins.

Une coupe NW-SE (figure 08) permet de mieux connaître les caractéristiques du secteur, on rencontre du Nord au Sud :

- Djebel Chebka
- Synclinal d'Aflou
- Djebel Zlakh

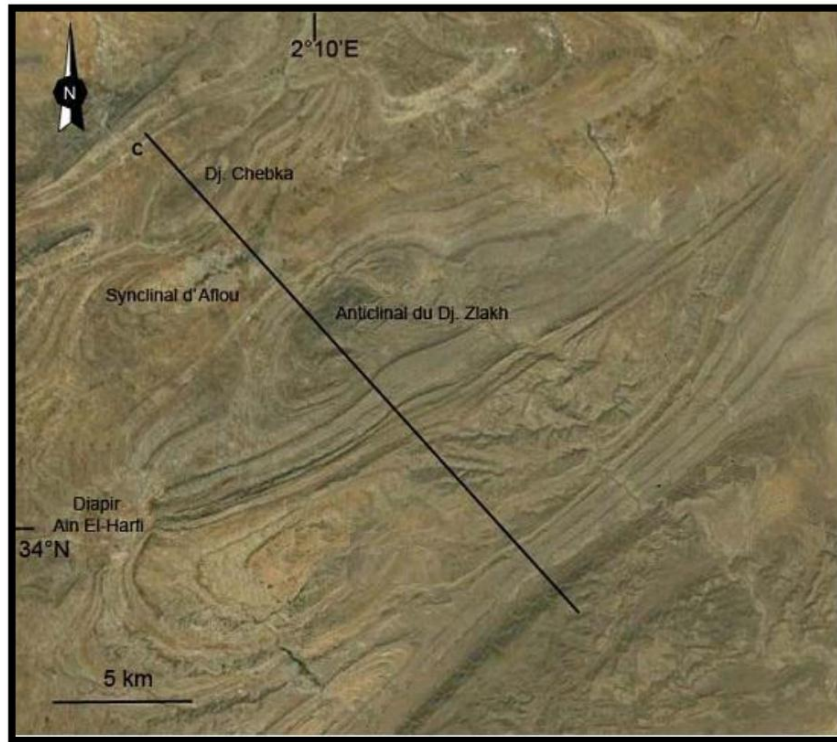


Figure08 : localisation de coupe sur une photo satellite de la zone d'étude
(Photo : Google Earth)

- **Djebel Chebka** : le Djebel Chebka est un anticlinal étroit situé dans le Nord-Ouest de l'anticlinal du Djebel Zlakh séparé de ce dernier par le large synclinal d'Aflou. Son axe à matériel de Jurassique supérieur est parcouru dans toute sa longueur par une faille N40° qui s'amortit au Sud-Ouest entre le Valanginien- Barrémien et l'Aptien et qui devient diffuse au niveau des affleurements crétacés à la terminaison périclinale du Djebel Gourou où est observé un diapirisme.
- **Synclinal d'Aflou** : il s'agit de formations gréseuses du Barrémien, Aptien et Albien, d'épaisseurs considérables, qui reposent sur les calcaires du Portlandien. Ces formations gréseuses constituent de grandes dalles de grés sub-horizontales au centre de la cuvette. Vers les bordures, le pendage des couches devient plus important et peut dépasser 45°. Ces grés sont très fracturés ; l'orientation de ce synclinal est NE-SW.
- **Djebel Zlakh** : c'est un anticlinal du Jurassique de style coffré dont la partie axiale présente une structure sub-horizontale qui devient de plus en plus accentuée vers les extrémités.

Il présente une direction analogue à celle du synclinal d'où il est affecté d'un faisceau de failles transversales de direction générale N13° E.

Il est à signaler qu'aux niveaux de ces failles et au cœur de l'anticlinal la présence de roches triasiques. Elles témoignent la nature profonde de ces failles transversales.

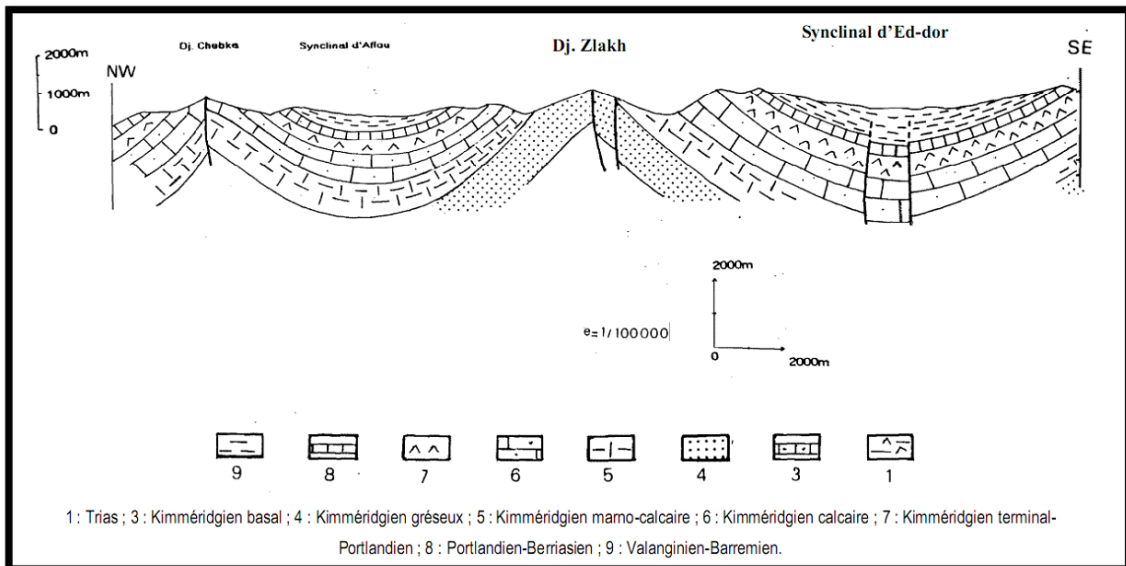


Figure 09 : Coupe sériée à travers les structures du Djebel Amour (zone d'étude) (Nouar, 1992).

2.2 La fracturation du synclinal d'Aflou :

Un système de failles et de flexures qui se relie du (Sud-Ouest au Nord- Est) avec un rejet parfois supérieur à 2000 mètres et qui ont pour résultat un abaissement général du Sahara vis-à-vis de sa bordure atlasique.

La fréquence des plis anticlinaux à cœur triasique souvent de type coffré intercalés par des synclinaux à axes grossièrement orientés Sud-Ouest au Nord- Est.

La tectonique cassante au niveau de notre secteur (figure 10) est marquée par :

- Accident majeur N60°E
- Des fractures transversales
- Un réseau de fissures et diaclases

a) **Accident majeur N60°E :**

Il s'allonge du flanc Sud-Ouest du Djebel Sidi okba jusqu'au flanc Nord du Djebel Gourou sur une vingtaine de Kilomètres. Cet accident parallèle aux axes de plissement de direction N60°E, forme une zone de fracturation d'une vingtaine de mètres de largeur. Il s'agit d'une faille inverse à très fort rejet sub-vertical qui met en contact le calcaire du Portlandien avec les marnes, grés du Cénomanién au Sud-Ouest de Sidi Boulefaa. Il présente un fort pendage de l'ordre de 70° à 80°SE.

b) **Des fractures transversales :**

Il s'agit d'un ensemble de failles dont un certain nombre joue en décrochement dextre de direction N130°E N160°E, d'autres jouent en failles verticales à sub-verticales de direction N130°E à N140°E, à titre d'exemple, celle qui recoupe la cuvette passant par la ville d'Aflou, de direction N140°E de rejet d'ordre 100 mètres atteignant même les formations calcaires du Portlandien.

c) **Un réseau de fissures et diaclases :**

Les mesures sur les directions des fissures ont permis de faire ressortir quatre directions correspondant à des maxima de fréquences, parmi lesquelles on peut souligner celles qui affectent plus particulièrement les grés de Barrémien. Il s'agit des orientations principales N60° -N80° et N140°N160°.

On peut remarquer une certaine concordance entre les failles et les fissures suivant les directions N60° -N80° et N140°N160°. À ce niveau, les failles constitueraient des drains naturels des eaux souterraines et pourraient être le siège des zones privilégiées au captage de la nappe formée par les formations gréseuses du Barrémien.

Sur le plan hydrographique, elles facilitent l'infiltration des eaux en direction des nappes profondes participant ainsi à leur alimentation. En effet, la circulation des eaux souterraines dans les formations grés-albo-aptien se fait à travers les fissures.

L'étude de la fissuration dans les différents forages a montré qu'elle se poursuivait jusqu'à une profondeur dépassant les 100 mètres.

C'est aussi au niveau de ces fissures à côté du réseau de failles principales que se localisent la plupart des émergences naturelles importantes des eaux souterraines.

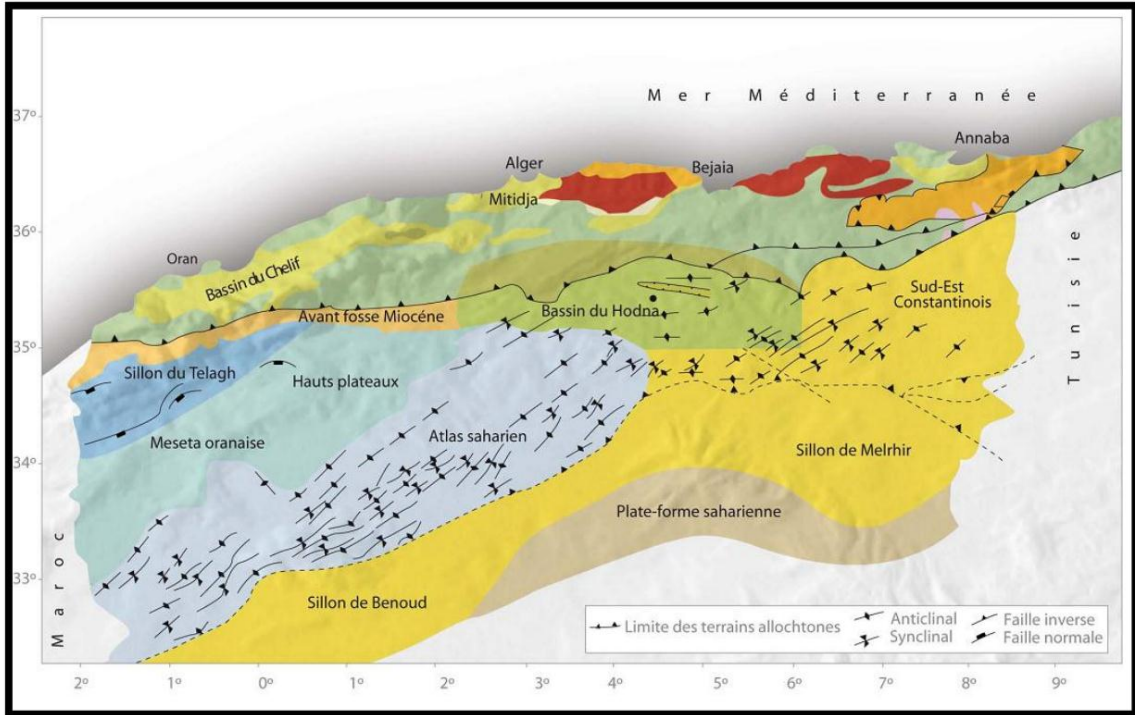


Figure 10 : Cadre structural du Nord de l'Algérie, montrant les principales structures de l'Atlas Saharien (d'après WEC Algérie, 2007)

Par ailleurs, la chaîne Atlasique est prise entre deux lignes d'accidents majeurs, qui sont les accidents Nord et Sud atlasiques.

- ❖ **L'Accident Sud Atlasique** correspond à une succession d'accidents d'orientation générale ENE-WSW qui se relaient et qui s'étendent d'Agadir au Maroc jusqu'au golfe de Gabès en Tunisie. Il sépare le domaine saharien relativement stable du domaine atlasique plissé.
- ❖ **L'Accident Nord Atlasique** sépare un domaine atlasique plissé au Sud d'un autre pré-atlasique peu déformé au Nord. Cet accident, direction NE-SW devenant E-W au niveau de Bou Saada, se suit de Bou Arfa au Maroc jusqu'à Zahrez Chergui en Algérie. Dans l'Atlas Saharien Central, il se prolonge du NE d'El Bayadh jusqu'au Nord de la ville d'Aflou.

IV. Historique des travaux :

Des travaux antérieurs ont été réalisés dans la région étudiée et des régions avoisinantes.

Parmi les plus importants, on peut citer les travaux de :

- ❖ **Etienne Ritter (1902)** qui donna une description stratigraphique du Djebel Amour et des Monts des Ouled Naïl.
- ❖ **Flamand(1911)** et **Laffitte (1913)** qui ont révisés les séries géologiques de l'Atlas Saharien.
- ❖ La région a été ensuite étudiée lors de l'établissement de la carte géologique au 1/200.000e de Laghouat par l'IAP sous la direction de **J. Guillemot**.
- ❖ **Emberger (1960)** a fait une Esquisse géologique de la partie orientale des Monts des Ouled Nail.
- ❖ **Caratini (1961)** range les calcaires d'Aflou et les grés dans le Barrémien-Aptien-Albien après avoir décrit minutieusement les formations du Djebel Sidi-Okba.
- ❖ **Basseto (1967)**, présente une note consacrée au passage Jurassique-Crétacé dans le Djebel Lazreg de Laghouat. Dans la même année, **Lucas** et **Galmier** donnent des indications nouvelles sur la bordure méridionale de l'Atlas Saharien.
- ❖ **Busson(1970)** réalise une synthèse fondamentale sur le secondaire Saharien et met en évidence les différences et les ressemblances entre le domaine Saharien et le domaine Atlasique.
- ❖ **Marks et al. (1972)** ont publié un article sur la structure d'Ain El Harfi située près d'Aflou.
- ❖ **Les géologues de la SONATRACH (1978)** travaillent dans les Monts du Djebel Amour, rangent les calcaires de Chebka, El-Mezara et Djahaiifa (région d'Aflou)
- ❖ Les séries du Jurassique du Djebel Amour ont l'objet d'une étude détaillée par **S. Abed (1982)**.
- ❖ En 1983 **M.Mahboubi**, dans son étude sur la Géologie et la Paléontologie du Crétacé post-Albien et du Tertiaire de la bordure méridionale du Djebel Amour donne des précisions stratigraphiques sur l'Albien supérieur, le Turonien inférieur et le Tertiaire ancien sur la base des coupes établies dans la région d'El Khol (Sud Est de Brezina).
- ❖ **Stamboul Madani(1983)** a réalisé sa thèse de Magister sur l'étude hydrogéologique de la haute vallée du Sebgag (Djebel Amour, Atlas Saharien Central, Algérie).

- ❖ **Stamboul M. et Rouquet L. (1984)** présentaient des résultats préliminaires sur l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Sebgag.
- ❖ **Kazi-Tani (1986)** décrit dans sa thèse les séries du Jurassique et du Crétacé de la région.
- ❖ Enfin, une étude structurale du Djebel Amour en utilisant la télédétection a été réalisée par **O. Nouar (1992)**.
- ❖ **Stamboul Madani (2002)** a préparé sa thèse de Doctorat sur la Contribution à l'étude hydrogéologique de l'Atlas Saharien.

Deuxième chapitre :
Hydro-climatologie du synclinal
d'Aflou

Partie 01 : Climatologie

Introduction :

Le mouvement de l'eau dans le sol et le sous-sol est une étape d'un grand circuit sur la terre. La source d'alimentation de l'eau souterraine est l'infiltration qui renouvelle l'eau des réservoirs souterrains et entretient, par son circuit dans les aquifères, le débit de l'écoulement souterrain [Castany 1998].

La connaissance des facteurs climatiques (pluviométrie, température.....) est indispensable pour quantifier les ressources en eau et déterminer la part de l'eau qui s'infiltré.

L'objectif de cette étude est l'analyse de ces facteurs et la détermination des différents termes du bilan d'eau.

I. Choix des stations :

Toute étude climatique est basée sur la collecte des données, la quantité et la qualité de ces dernières conditionnent les résultats obtenus.

Pour mener notre travail on a étudié les paramètres climatiques de six stations pluviométriques réparties d'une façon plus au moins uniforme de telle sorte que :

- ❖ Les stations de Sidi Bouzid et Oued Morra se localisent au Nord du synclinal d'Aflou
- ❖ La station d'Aflou se situe au centre.
- ❖ les stations de Sebgag, Brida et celle de Seklafa se situent dans la partie méridionale du synclinal d'Aflou

Les stations retenues sont représentées dans le tableau 01 et sur la carte de la figure 11.

Tableau 01 : Coordonnées des stations pluviométriques

Station	Code de la station	Longitude	Latitude	Altitude(m)	Installation
Seklafa	060104	2°21'3'' E	33°59'51''N	1233	Après 1960
Sidi Bouzid	010204	2°15'43'' E	34°20'35''N	1267	Après 1960
Oued Morra	060103	2°19'9'' E	34°9'34''N	1304	Après 1960
Brida	010101	1°45'6'' E	33°56'56''N	1400	Après 1960
Sebgag	010102	1°54'16'' E	34°00'10''N	1402	Après 1960
Aflou	010208	2°6'8'' E	34°6'46''N	1406	1874

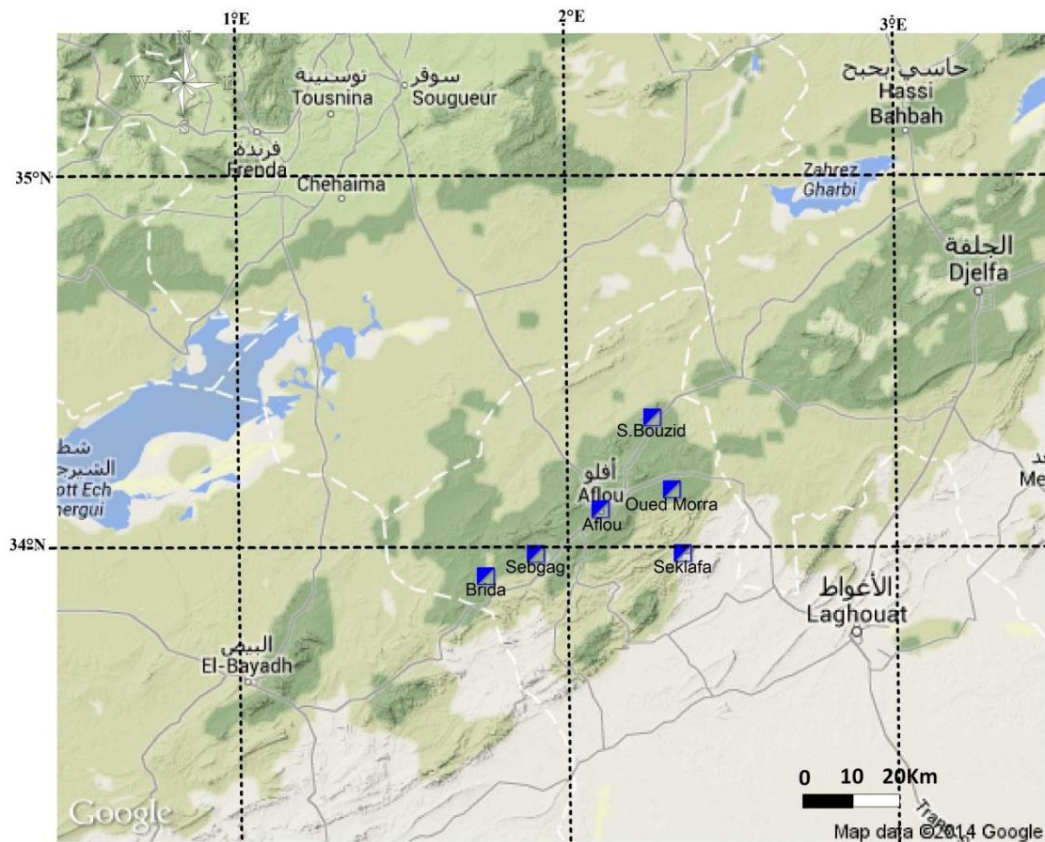


Figure 11 :Positionnement des stations pluviométriques

II. Conditions locales :

En raison de la situation géographique du secteur d'étude, situé à 300 Kilomètres du littoral, l'action de la Méditerranée se trouve estompée pendant que s'affirment les influences sahariennes.

Cette position en latitude constitue un facteur essentiel commandant la climatologie de la région d'Aflou car celle-ci coïncide avec :

- la limite méridionale occupée par le front polaire
- l'aire de stationnement du front Méditerranéen II

1. Nébulosité :

La nébulosité intéresse la fraction du ciel couvert par les nuages. Elle varie entre 0 pour un ciel clair à 10 octas pour un ciel entièrement couvert. On dispose des observations rapportées par Seltzer (1913-1938) réalisées à Aflou. Les résultats sont portés dans le tableau 02.

Tableau 02 : Nébulosité à Aflou

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Moyenne
Nébulosité en octas	4,5	4,7	4,1	3,8	3,6	3,0	2,0	2,2	2,8	3,2	4,0	4,2	3,5

Du Novembre au Mai, ce sont les mois où il y'a plus de nuages par rapport à la moyenne.

Tandis que les mois allant du Juin au Septembre sont plus clairs.

2. Insolation :

L'insolation représente la durée d'enseillement horaire ou journalière. La figure 12 expose les distributions moyennes quotidiennes de la durée d'insolation horaire pour la période allant de 1973 à 1990 à Aflou.

Tableau 03 : Insolation à Aflou

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
Insolation	58	62	74	84	95	109	109	99	89	77	66	57

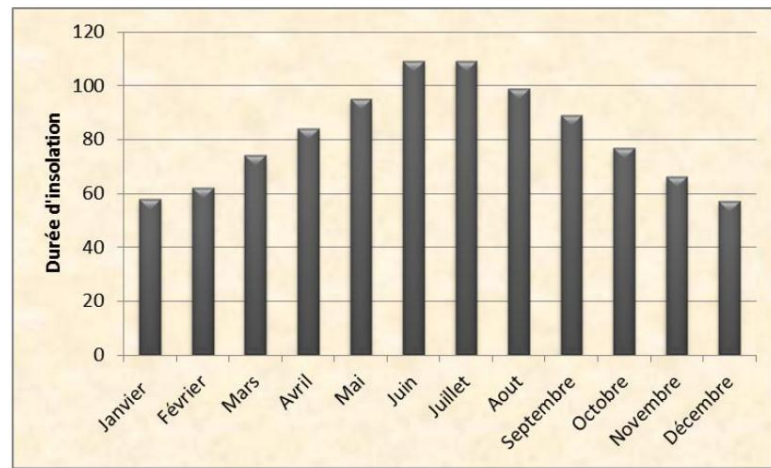


Figure 12 : Répartition moyenne quotidienne de l'insolation

La répartition de la durée moyenne quotidienne d'insolation présente un maximum en mois de Juillet avec 109 heures observées à Aflou et un minimum en Janvier avec 58 heures.

3. Humidité relative :

L'humidité relative est définie par le rapport à la pression atmosphérique, à la température, à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Elle est exprimée en pourcentage. On dispose les données de la station d'Aflou pour la période 1967-1979 qui sont reportées dans le tableau 04.

Tableau 04 : Humidité relative à Aflou

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Moyenne
Humidité	67	67	59	52	45	36	32	32	46	57	64	73	52,5

Le taux hygrométrique de l'air avoisine les 32 % en mois de Juillet et Août tout étant les mois les plus secs. Décembre est le mois le plus humide avec 67 % (figure13).

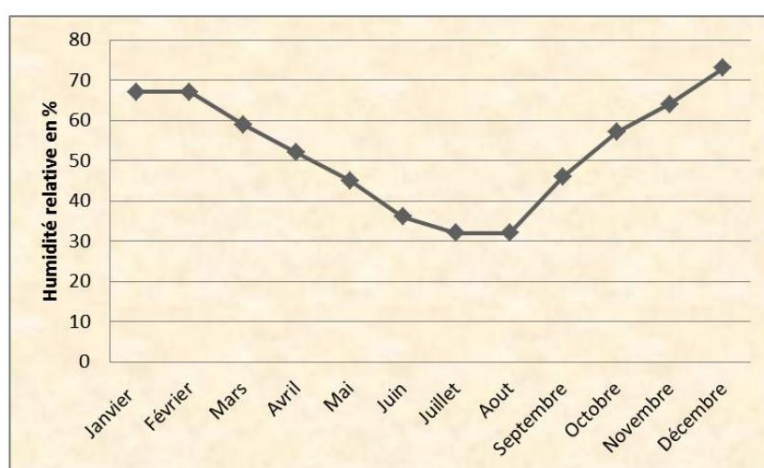


Figure 13 : Courbe de l'humidité moyenne relative

4. Étude des vents :

Le régime des vents est en rapport direct avec la circulation générale de l'atmosphère, ce sont les hautes pressions tropicales qui auront un rôle majeur.

Ces hautes pressions tropicales connaissent des déplacements en latitude au cours des saisons. Elles se dégradent lorsqu'elles s'installent sur le continent africain après avoir été particulièrement importantes sur l'océan Atlantique. En hiver les hautes pressions occupent les latitudes les plus basses, en permettant aux perturbations du front polaire de descendre sur les marges Sud Atlantique et le Sahara septentrional.

En été les influences sahariennes s'étendent dans toute l'Algérie septentrionale remontant jusqu'au Sud de l'Europe, favorisées par le déplacement des hautes pressions vers les latitudes les plus élevées.

Les données de la vitesse du vent exprimées en m/s relatives à la station d'Aflou (1990-1999) sont représentées dans le tableau 05.

Tableau 05 : Vitesse de vent à Aflou

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
Vitesse du vent	3,0	3,4	3,4	3,3	3,2	3,0	2,7	2,7	2,6	2,5	2,8	3,2

Les vents sont fréquents sur tous les mois avec une vitesse moyenne annuelle de 2,75 m/s.

En ce qui concerne les directions des vents, les données de la station d'Aflou ont été mises en considération et qui sont portées dans le tableau 06.

Tableau 06 : Direction des vents à la station d'Aflou (1990-1999)

Direction	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Fréquences en %	13	3	2	4	10	16	26	25

Les vents les plus fréquents à Aflou sont les vents d'Ouest (27%) et ceux Nord-Ouest (25%).

Par contre les vents les moins fréquents sont ceux d'Est avec 2% (Voir Figure 14).

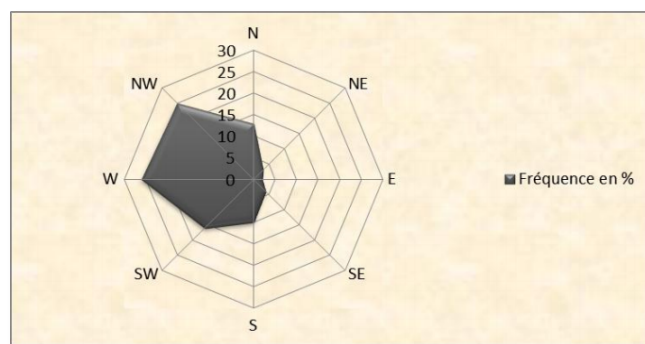


Figure 14 : Direction des vents à la station d'Aflou (1990-1999)

- **Les vents d'origine Nord :**

Les vents du Nord sont les plus fréquents pendant les mois de Janvier, Février, Mars, Octobre et Décembre. Ces vents sont à l'origine d'importantes précipitations quand les perturbations qui se forment sur la Méditerranée progressant vers le Sud algérien.

- **Les vents d'origine Est :**

Cette direction prédomine au cours des mois d'Avril jusqu'à Septembre avec quelquefois des vents soufflant du Nord au Sud. Les vents du Sud sont à l'origine du Sirocco qui atteint les côtes méditerranéennes. Ils sont fréquents pendant l'été c'est-à-dire pendant Juillet – Août et très rares pendant l'hiver mais peuvent se manifester au mois de Septembre.

- **Les vents d'origine Ouest :**

Ces vents sont présents pendant toute l'année avec cependant une certaine force remarquable au cours de l'hiver et du printemps. Les averses qu'on observe pendant ces deux saisons sont dues à ces vents qui circulent d'Ouest en Est.

- **Les vents d'origine Sud :**

On a longtemps attribué à l'ensemble des vents chauds et secs venus du Sud sous l'appellation générique Sirocco.

5. Les phénomènes accidentels :

Le tableau 07 résume la répartition des phénomènes accidentels (exprimés en jours) de la station d'Aflou pour la période allant de 1990 au 1999.

Tableau 07 : Phénomènes accidentels à la station d'Aflou (1990-1999)

Mois	Brouillard	Gelée Blanche	Verglas	Neige	Sirocco	Tempête de sable
Janvier	2,0	6,5	1,9	1,3	0,0	0,9
Février	0,8	5,3	0,6	1,4	0,0	1,2
Mars	1,0	1,0	0,0	0,3	0,5	3,6
Avril	0,4	0,0	0,0	0,2	1,5	4,7
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	5,2
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	4,6
Juillet	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	7,2
Août	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	5,0
Septembre	1,0	0,0	0,0	0,0	0,7	5,0
Octobre	1,5	0,0	0,0	0,0	0,5	3,2
Novembre	1,6	1,7	0,0	0,4	0,3	2,3
Décembre	2,5	4,4	0,7	0,5	0,0	1,1
Cumul	10,8	18,9	3,2	4,1	19,2	45,5

- **Le sirocco** : le sirocco vent sec et chaud venu du Sud qui se met en place lorsqu'un système dépressionnaire se déplace en Méditerranée en bordure des cotes algériennes. En hiver, le Sirocco pourra donner des effets spectaculaires, lorsque les sables qu'il véhicule viendront colorer en rouge les neiges pyrénéennes ou salir les véhicules en Allemagne, Belgique et les Pays-Bas.

- **La gelée blanche** : on l'observe de Novembre au Mars avec un maximum marqué en Janvier et maximum secondaire en Décembre.

- **Le brouillard** : les premières nappes de brouillard se manifestent dès le mois de Septembre c'est cependant en Décembre et surtout en Janvier que l'on pourra l'observer le plus fréquemment. En Mai l'échauffement sera suffisant pour qu'on ne le rencontre plus.

6. Les précipitations :

La pluviométrie demeure le paramètre le plus important, elle conditionne l'écoulement, le régime des cours d'eau et l'alimentation des nappes d'eau souterraines.

6.1 Précipitations annuelles :

Les hauteurs des précipitations moyennes annuelles majoritairement sont fournies par les services gestionnaires de l'ANRH. Bien que Les lacunes dans les séries d'observations aient été comblées par corrélation linéaire, certaines données ; notamment Oued Morra, Sebtag et partiellement Sidi Bouzid ; doivent être utilisées avec prudence pour des raisons de fiabilité de l'ensemble des séries pluviométriques.

6.1.1 Variation de la pluviométrie annuelle :

Les moyennes calculées pour les six stations sont portées dans le tableau 08 pour la période 1990-2011.

Tableau 08: Précipitations moyennes annuelles des six stations

Année	Seklafa	S. Bouzid	O. Morra	Brida	Sebgag	Aflou
1990	116	149,9	114,8	133,6	126,0393	243,8
1991	205,1	320,54	125,3	189,8	134,34	387
1992	109,32	86,39631	89,56524	115,2868	105,5318	202,8
1993	100,7131	28,43565	79,70309	102,669	88,57569	168,9
1994	263	275,3241	121,7118	158,6	178,03	313,3
1995	317,9	341	152,4	126,2	206,31	330,6
1996	159,1	102,5	87,11	155,634	128,22	311,2
1997	193,3	459	154,38	155,4107	202,16	310,6
1998	198,3	106,2	91,65985	117,9667	109,1331	210
1999	119,7	67,07609	86,27785	111,0809	153,1	191,5
2000	106,4	11,50909	76,82299	98,98419	83,6239	159
2001	138,4	28,43565	79,70309	102,669	88,57569	168,9
2002	163,7496	164,1901	102,802	132,2222	128,2901	248,3
2003	266,8	240,7	137,6832	176,8498	188,2618	368,2
2004	161,1297	158,5479	101,842	130,9939	126,6395	245
2005	223,5	490,6	120,6034	154,9975	138,1	309,49
2006	172,04	280,8	133,86	203,0605	103	438,62
2007	121,02	146,9	84,74181	109,1157	97,23883	186,22
2008	235,93	335,8494	109,75	169,5917	177,1	348,7
2009	259,24	300,8678	126,0581	161,9764	198,4	328,24
2010	190,59	207,8059	110,2234	141,7172	139,9	273,81
2011	250,18	269,169	120,6645	155,0757	191,1	309,7

La figure 15 visualise l'évolution de la pluviométrie annuelle sur une période de 21 ans (1990/2011) où l'on remarque que les hauteurs maximales des précipitations atteignent 438,62 mm au niveau de la station d'Aflou au cours de l'année 2006 tandis que les hauteurs minimales de l'ordre de 11,50 mm ont été enregistrée à la station de Sidi Bouzid en 2000.

La variation temporelle de ces précipitations annuelles montre le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre (dents en scie).

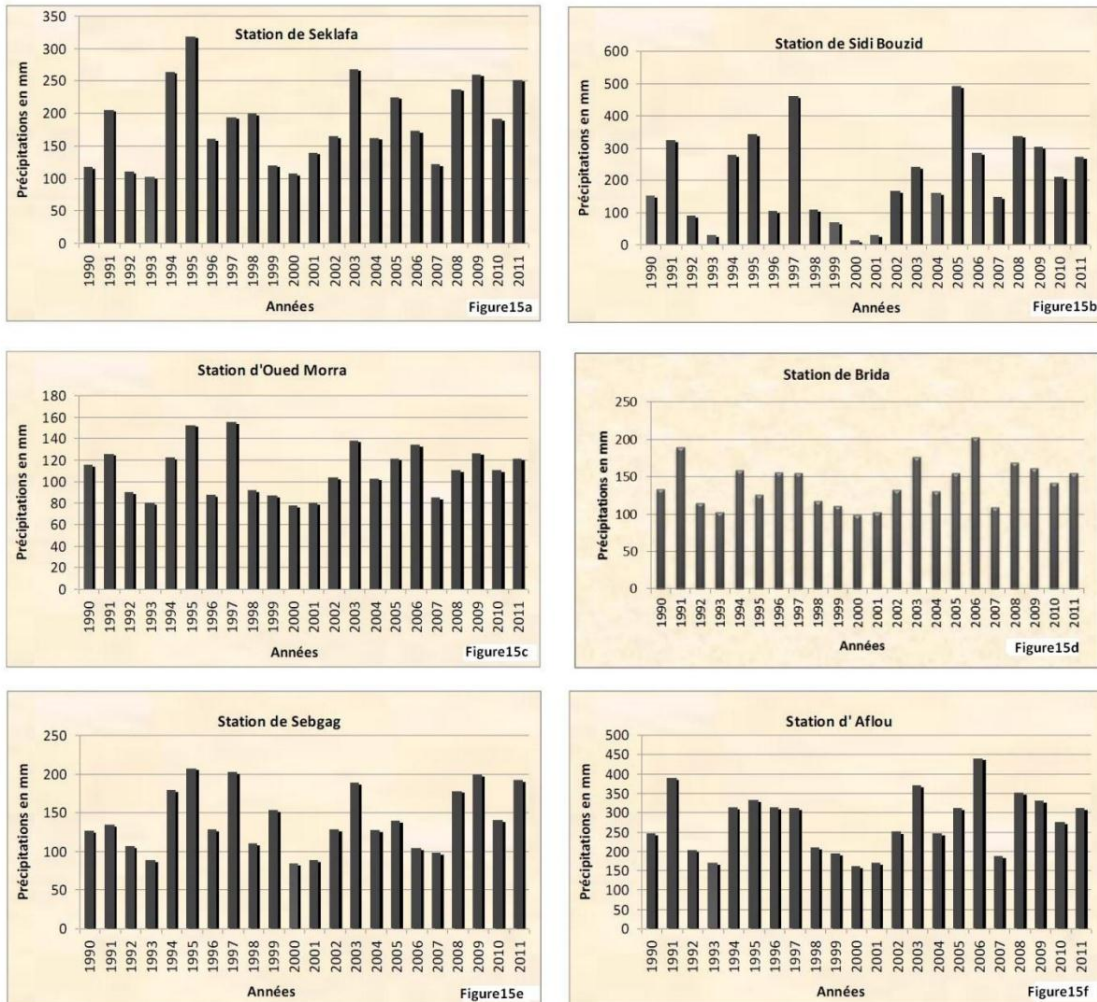


Figure 15 (a, b, c, d, e, f) : Variations des précipitations moyennes annuelles des six stations

6.1.2 Le coefficient pluviométrique :

C'est un paramètre climatique très important, définit comme étant le rapport de la pluviométrie d'une année à la pluviométrie moyenne pour une station donnée (Tableau 09).

$$H = \frac{P_i}{P}$$

Avec :

H : coefficient pluviométrique

P_i : pluviométrie d'une année donnée

P : pluviométrie moyenne pour une période de N années

Tableau 09: Valeurs du coefficient pluviométrique (1990-2011)

Année	Seklafa	S.Bouزيد	O.Morra	Brida	Sebgag	Aflou
1990	0,62	0,72	1,048	0,94	0,89	0,88
1991	1,10	1,54	1,14	1,34	0,95	1,40
1992	0,59	0,41	0,81	0,81	0,75	0,73
1993	0,54	0,13	0,72	0,72	0,63	0,61
1994	1,42	1,32	1,11	1,12	1,26	1,13
1995	1,71	1,64	1,39	0,89	1,46	1,20
1996	0,85	0,49	0,79	1,10	0,91	1,13
1997	1,04	2,20	1,41	1,10	1,43	1,12
1998	1,07	0,51	0,83	0,83	0,77	0,76
1999	0,64	0,32	0,78	0,78	1,08	0,69
2000	0,57	0,05	0,70	0,70	0,59	0,57
2001	0,74	0,13	0,72	0,72	0,63	0,61
2002	0,88	0,79	0,93	0,93	0,91	0,90
2003	1,44	1,15	1,25	1,25	1,33	1,33
2004	0,87	0,76	0,93	0,92	0,90	0,89
2005	1,20	2,36	1,10	1,09	0,98	1,12
2006	0,92	1,35	1,22	1,43	0,73	1,59
2007	0,65	0,70	0,77	0,77	0,69	0,67
2008	1,27	1,61	1,00	1,20	1,26	1,26
2009	1,40	1,44	1,15	1,14	1,41	1,19
2010	1,02	0,99	1,00	1,00	0,99	0,99
2011	1,35	1,29	1,10	1,09	1,35	1,12

Le coefficient pluviométrique nous permet de déterminer les années excédentaires et les années déficitaires.

$H > 1$: Année excédentaire ; $H < 1$: Année déficitaire

L'étude de l'évolution annuelle des six stations pour la période 1990-2011, a mis en évidence 8 années excédentaires à la station de Sebgag ; 10 ans à la station de Sidi Bouzid ; 11 ans aux stations de Seklafa, Aflou et de Brida ; 12 ans à la station d'Oued Morra.

6.1.3 Ajustement des précipitations à une loi statique :

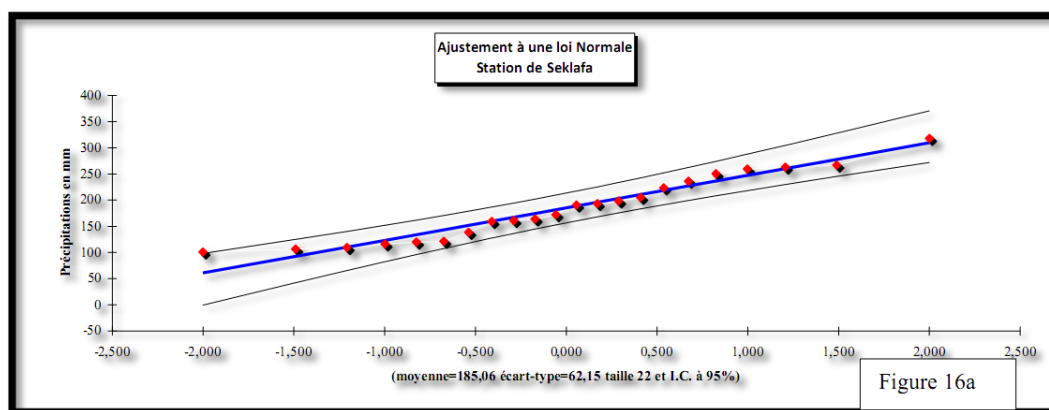
Pour mieux cerner cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui a un rôle essentiel sur l'écoulement superficiel et afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, on va essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement.

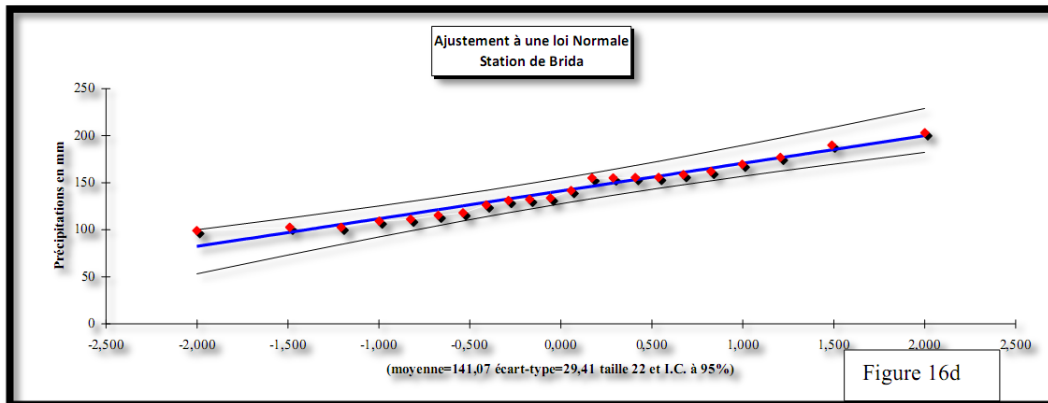
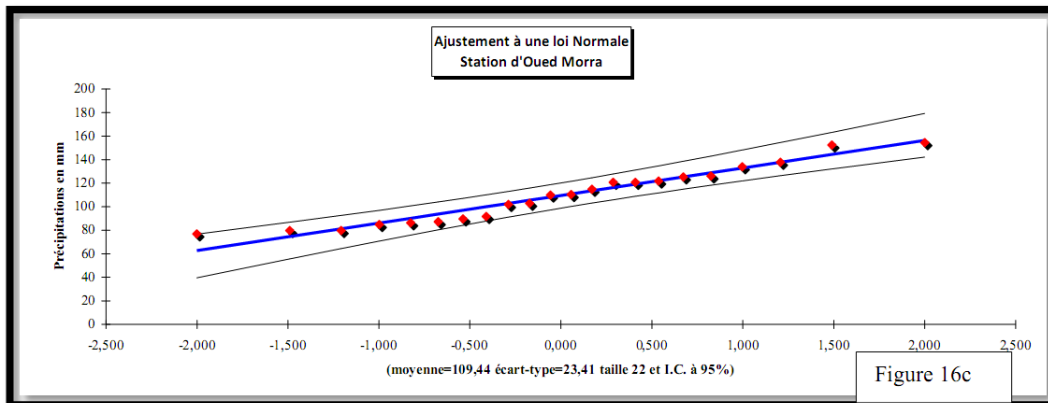
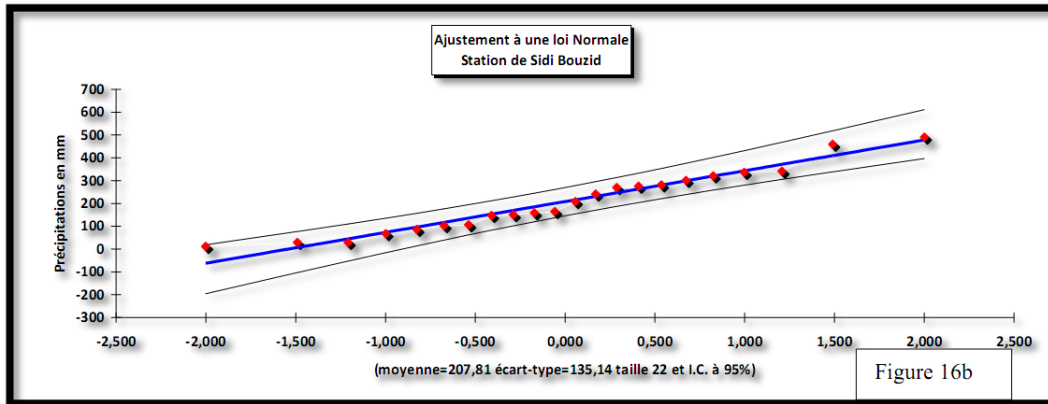
Tableau 10: Calcul des paramètres statistiques des six stations

Station	Moyenne en mm	Maximale en mm	Minimale en mm	Écart-type	Coefficient de variation
Seklafa	185,06	317,9	100,71	62,14	0,33
S. Bouzid	207,80	490,6	11,50	135,14	0,65
O. Morra	109,43	154,38	76,82	23,40	0,21
Brida	141,06	203,06	98,98	29,40	0,28
Sebgag	140,53	206,31	83,62	40,29	0,28
Aflou	275,17	438,62	159	78,26	0,28

A. Test graphique :

L'ajustement graphique des séries pluviométriques des six stations (figure 16) ; montre que la pluie s'ajuste en général suivant une loi normale de Gauss.





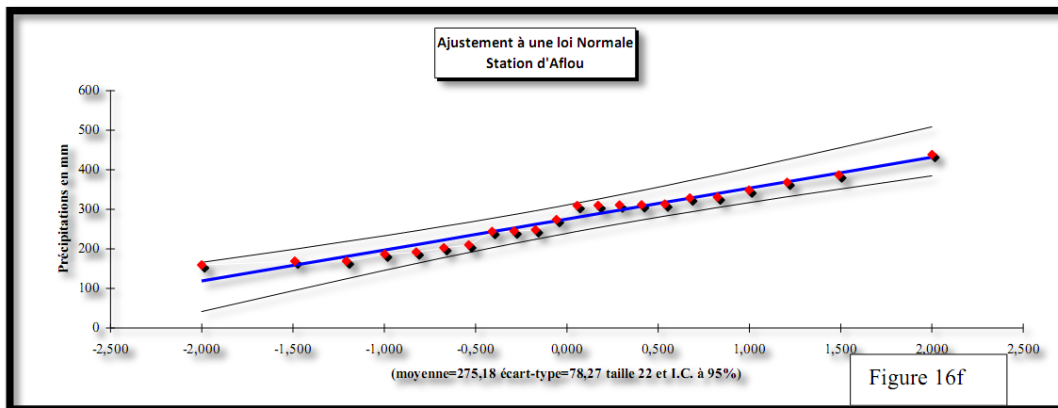
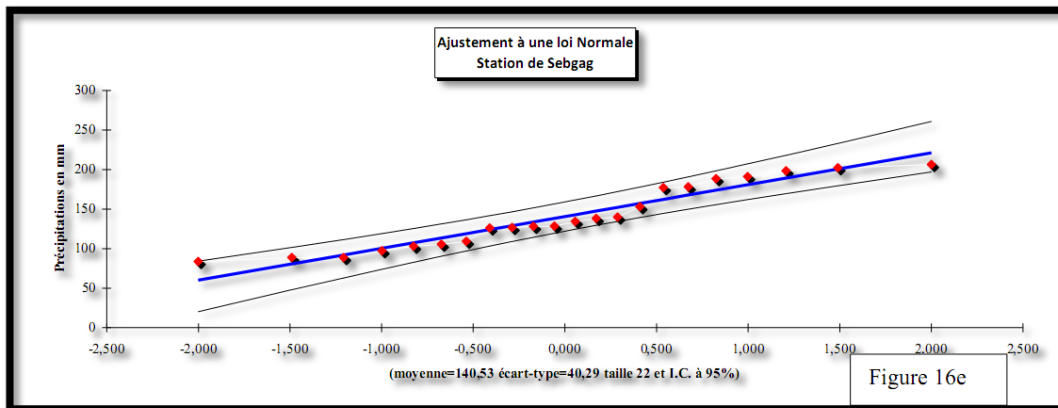


Figure 16 (a, b, c, d, e, f) : Ajustement graphique des Précipitations moyennes annuelles à la loi normale

B. Test du χ^2 :

Le coefficient de variation $Cv < 0,5$; dans la plupart des stations ; laisse fortement penser que l'ajustement suit une loi normale, le test du χ^2 permettra de vérifier cette adéquation. Afin de déterminer la valeur du χ^2 , on a repris les séries des modules observés et on a réparti ces valeurs en classes (voir Annexe I). Les résultats obtenus de χ^2 calculé et le χ^2 tabulé sont représentés dans le tableau 11.

Le χ^2 calculé étant inférieur au χ^2 tabulé, pour un degré de liberté égal à 2 (5 classes et 2 paramètres) et un risque d'erreur tolérée de 5 %, l'ajustement permet donc d'admettre une distribution normale des précipitations pour les six stations.

Tableau 11 : Valeurs de x^2 tabulé et x^2 calculé pour les six stations

Stations	Test de x^2	
	x^2 calculé	x^2 tabulé
Seklafa	4,34	5,96
S. Bouzid	2,98	5,96
O. Morra	3,88	5,96
Brida	3,88	5,96
Sebgag	2,07	5,96
Aflou	2,53	5,96

C. Calcul des précipitations pour des périodes de récurrence donnée et la période de retour :

La Fonction de distribution à la loi normale :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-u^2/2} du \quad \text{Avec } u = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}$$

μ est appelée variable réduite de Gauss. L'intervalle de définition est donc : $x \in]-\infty, +\infty[$.

Pour le Calcul des fréquences expérimentales (au non dépassement) on applique :

$$F(x_i) = \frac{ni - 0.5}{N} \quad \text{et} \quad T = \frac{1}{1 - q}$$

ni : numéro d'ordre de la valeur

N : taille de l'échantillon

**Tableau 12: Précipitations annuelles fréquentielles et périodes de retour des valeurs
Caractéristiques (en mm)**

Fréquence	Paramètres	Seklafa	S .Bouزيد	O. Morra	Brida	Sebgag	Aflou
Précipitations décennales	Période forte F=0,9 ; $\mu=1,28$	264,61	380,79	139,40	178,70	192,10	375,36
	Période faible F=0,1 ; $\mu=-1,28$	105,51	34,81	79,47	103,42	88,95	174,99
Précipitations centenaires	Période forte F=0,99 ; $\mu=2,32$	329,25	521,33	163,74	209,22	234,02	456,76
	Période forte F=0,01 ; $\mu=-2,32$	40,87	105,72	55,12	72,84	47,05	93,59
Précipitations millénaires	Période forte F=0,999 ; $\mu=3,09$	377,10	625,40	181,77	231,93	265,02	517,02
	Période faible F=0,001 ; $\mu=-3,09$	6,97	209,78	37,10	50,20	16,03	33,32
Période de retour	Précipitation maximale	60	54	36	56	19	53
	Précipitation minimale	11	13	12	13	12	14

6.2 Précipitations mensuelles :

La répartition des variations mensuelles des précipitations dans l'année conditionnent, en relation avec les facteurs thermiques, l'écoulement saisonnier et par là même le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères.

Les variations moyennes mensuelles des précipitations des stations d'Aflou et de Seklafa pour la période 1990-2011 sont portées dans le tableau suivant.

Tableau 13: Précipitations moyennes mensuelles période 1990-2011

Stations	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
Aflou	33,06	31,76	24,14	26,64	24,68	12,15	11,94	15,10	27,82	24,22	18,97	24,83
Seklafa	14	13	19	15	17	14	5	11	19	23	16	17

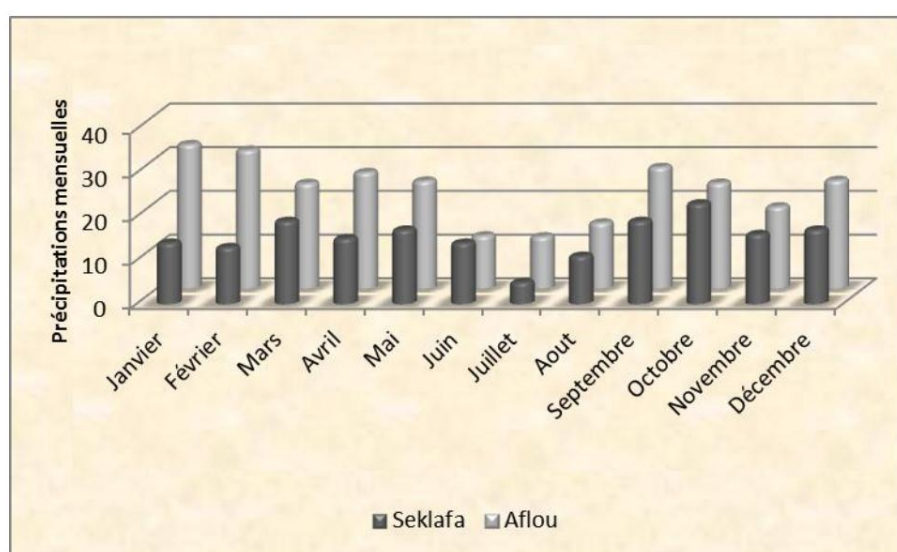


Figure 17 : Précipitations mensuelles (1990-2011)

Les histogrammes de la figure 17 représentent la répartition des précipitations moyennes mensuelles des stations d'Aflou et de Seklafa relative à la période 1990/2011.

Pour station d'Aflou, Janvier le mois le plus pluvieux avec une lame précipitée de 33,06 mm.

Le minimum apparait en Juillet avec 11,94 mm.

Dans le cas de la station de Seklafa, Octobre est le mois où les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 23 mm. Tandis que Les précipitations moyennes les plus faibles sont enregistrées en Juillet avec 5 mm seulement.

6.3 Étude de la pluviométrie saisonnière:

Le tableau 14 rassemble les données des précipitations saisonnières des deux stations pour la période (1999/2011).

Tableau 14 : Précipitations saisonnières pour la période (1990/2011)

	Moyenne saisonniere	Hiver	Printemps	Eté	Automne	Indice Saisonnier
Aflou	mm	89,65	75,46	39,19	70,83	HPAE
	%	33	27	14	26	
Seklafa	mm	44	51	30	58	APHE
	%	24	28	16	32	

L'étude de la répartition saisonnière de la pluviosité (figure 18) montre que pour la station :

- ❖ D'Aflou, L'Hiver est la saison la plus humide avec un pourcentage 33% ; et une sécheresse en période d'Été avec 14 % des précipitations annuelles.
- ❖ De Seklafa, on remarque que l'Automne est la saison pendant laquelle sont enregistrées les plus grandes quantités de pluie avec un pourcentage de 32 %, l'Été est la saison la moins pluvieuse, période pendant laquelle le pourcentage de pluies atteint 16%.

Toutefois on remarque pour la station d'Aflou, une période relativement pluvieuse regroupant les saisons d'Automne, d'Hiver et de printemps et une saison sèche représentée par l'Été.

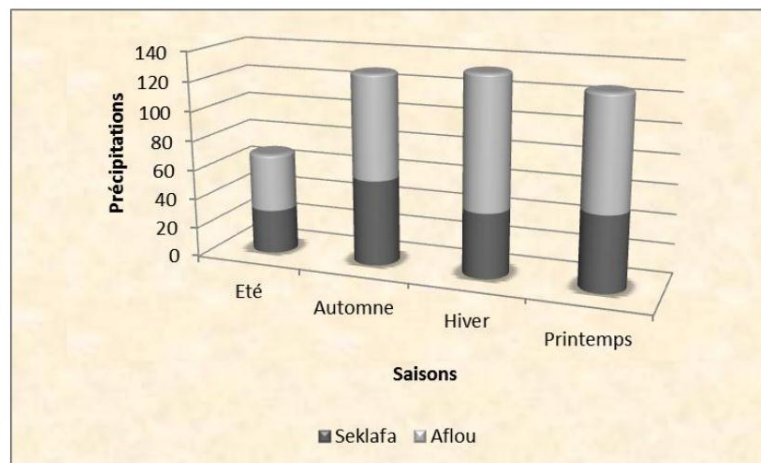


Figure 18 : Régime saisonnier de précipitations Période 1990-2011

6.4 Quotient pluviométrique :

Le quotient pluviométrique est le rapport de la hauteur des précipitations des saisons les plus pluvieuses sur celle des saisons les plus sèches. Les valeurs du quotient pluviométrique aux deux stations sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 15 : Quotient pluviométrique pour la période (1990/2011)

Station	Quotient pluviométrique
Aflou	1,53
Seklafa	1,47

D'après les résultats du tableau ci-dessus, on remarque que le quotient pluviométrique à Aflou est supérieur à celui de Seklafa.

7. Les températures :

Les températures moyennes, annuelle et mensuelles, régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologiques (insolation, vitesse et turbulence du vent, précipitations) et le phénomène d'évapotranspiration et par là-même le déficit d'écoulement annuel et saisonnier.

On dispose des données de températures moyennes mensuelles et annuelles de la station d'Aflou pour une période récente de 21 ans (1990/2011) et celles d'une période ancienne de 25 ans d'après SELTZER (1913-1938). Ces données sont mentionnées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 16 : Températures moyennes mensuelles et annuelles

Station	Période	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Moy.
Aflou	1913-1938	4,3	3,5	8,3	10,85	18,7	20,4	24,35	23,95	19,05	13,95	8,75	4,8	13,4
	1990-2011	3,9	4,4	8,05	10,75	16,05	19,3	24,2	24,75	20,75	15,2	10,6	5,65	13,63

La figure 19 montre que les températures moyennes faibles à la station d'Aflou s'observent au mois de Janvier, elles sont de l'ordre de 3,9°C et 4,3°C. Tandis que les températures moyennes fortes s'observent aux mois de juillet avec 24,35°C et d'Août avec 24,75°C. Quant à la température moyenne annuelle, elle est de 13,63°C à Aflou pour la période (1990-2011).

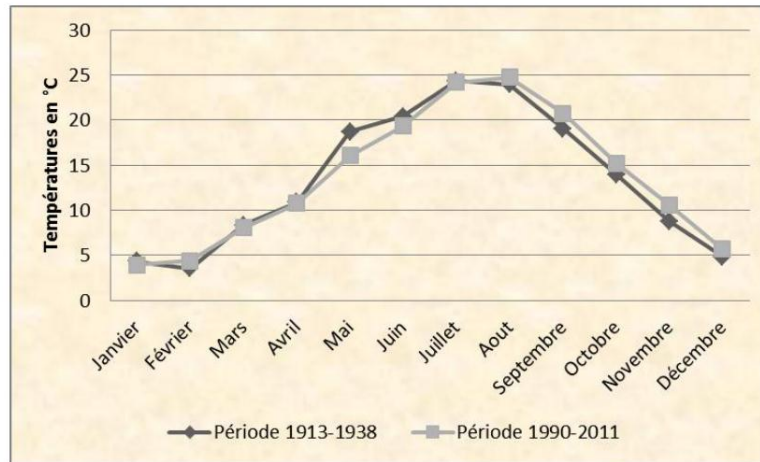


Figure 19: Variation mensuelle de température à la station d'Aflou

Concernant la série de la période 1990-2011, L'écart thermique entre le mois chaud et le mois froid varie de 20,85 °C.

Généralement la période froide, s'étend de Novembre à Avril; qui correspond à la période pluvieuse. La période chaude s'étend de Mai à Octobre correspondant à la saison estivale avec des pics importants en Juillet et en Août.

8. Relation Température-Précipitation :

8.1 Indice de Martonne :

En se basant sur le régime des précipitations et des températures De MARTONNE (1923) a défini un indice d'aridité "A".

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

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : température moyennes annuelles (°C)

Pour $A < 5$: climat hyperaride

$5 < A < 7,5$: climat désertique

$7,5 < A < 10$: climat steppique

$10 < A < 20$: climat semi-aride

$20 < A < 30$: climat tempéré

L'indice d'aridité estimé est de l'ordre de 11,64 [avec P=275,13 mm et T=13,63°C] indiquant donc un climat semi-aride pour la région d'Aflou (figure 20).

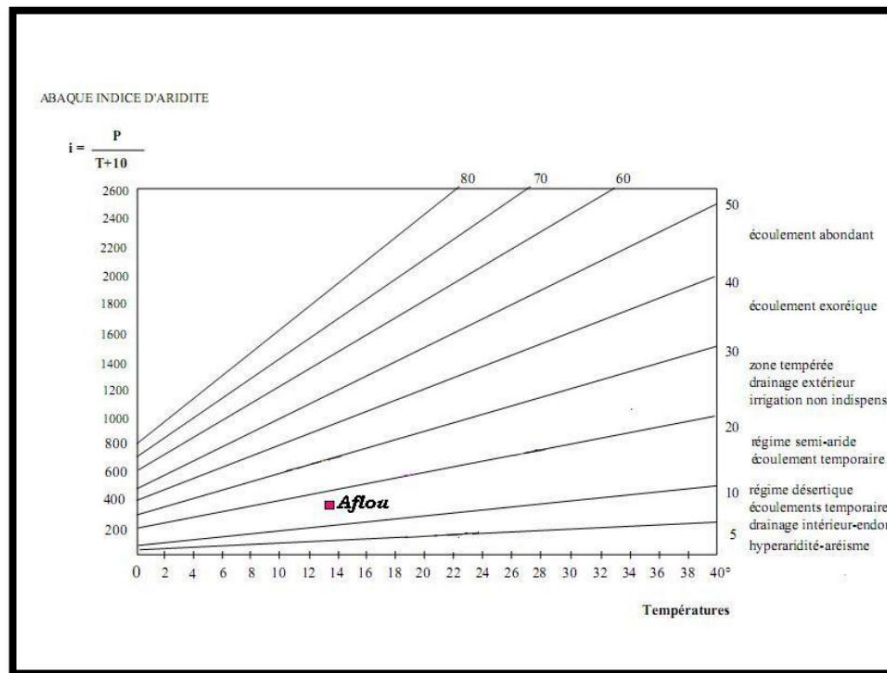


Figure 20 : Abaque de l'indice d'aridité annuel de De Martonne

De même, un indice d'aridité mensuel a été calculé au niveau de la station selon la formule

$$I = \frac{12 P}{T + 10} \quad \text{où}$$

I : Indice d'aridité mensuel

P : Précipitations moyennes mensuelles en mm

T : Température moyenne mensuelle en °C.

Les valeurs obtenues ont été mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Indice d'aridité mensuel (1990-2011)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
I	28,54	26,46	16,04	15,40	11,36	4,97	4,18	5,21	10,85	11,53	10,94	19,03

Les résultats obtenus, dans la station d'Aflou, montrent que les mois de Septembre, Octobre, Novembre, Décembre, Mars, Avril et Mai jouissent d'un climat semi-aride. Les Mois de Janvier et Février sont tempérés et pour les mois de Juin, Juillet, Août les valeurs de l'indice d'aridité indiquent un climat hyperaride.

8.2 Diagramme ombrothermique de Gausсен et Bagnouls :

Selon BAGNOULS et GAUSSEN (1953), un mois est dit sec si "le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température

moyenne, exprimée en degrés centigrades"; cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes ombrothermiques traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes.

Appliquée à la station d'Aflou, il résulte que la saison sèche s'étend du mois d'Avril jusqu'à mi-Novembre (figure 21).

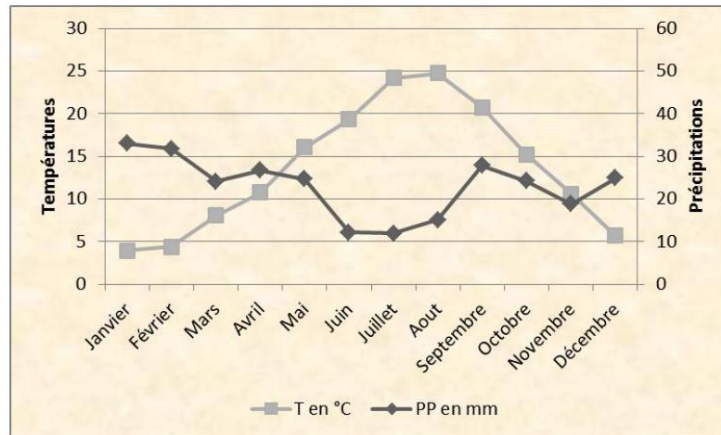


Figure 21 :Diagramme ombro-thermique de la station d'Aflou

8.3 Diagramme ombrothermique d'Euverte :

Par cette méthode on considère l'action de la chaleur et de l'humidité vis-à-vis de l'activité biologique. En effet les besoins en eau des plantes suivent une progression exponentielle et pour un accroissement de température de 6°C les besoins en eau doublent.

Le diagramme ombrothermique comporte en abscisse les mois de l'année et en ordonnées les températures en progression linéaire, et les précipitations en échelle logarithmique.

La courbe "T" passe au-dessus de la courbe "P" entre les mois d'Avril et Septembre (figure 22), il s'agit d'une période déficitaire.

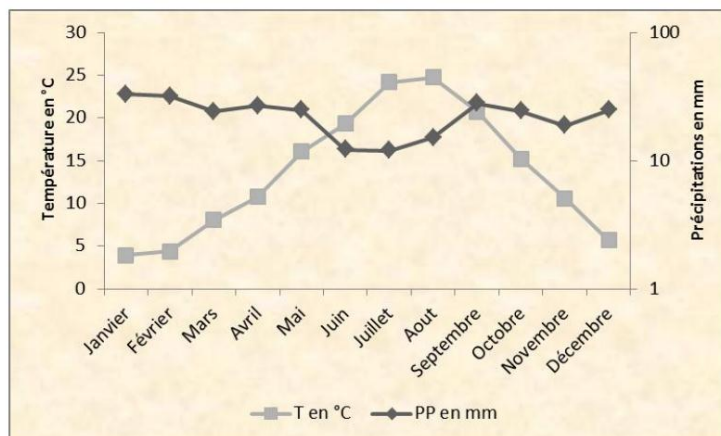


Figure 22 : Diagramme d'Euverte station d'Aflou

8.4 Indice pluviométrique de Moral :

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IA), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en °C. Cet indice permet de dire si :

- IA < 1 on a climat sec
 - IA > 1 on a climat humide
- Avec
$$IA = \frac{P}{T^2 - 10T + 200}$$

Où :

IA : indice pluviométrique annuel

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

T : température moyenne annuelle en °C

Appliqué à la station d'Aflou (avec P = 275,13 mm, T=13,63°C) ce qui donne IA = 1,10 On peut dire que le climat d'Aflou est à la limite sec-humide, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié de semi-aride.

8.5 Comparaison des méthodes :

L'ensemble des méthodes employées (période 1990-2011) ont confirmé que le climat de la région d'Aflou est défini comme semi-aride avec une période déficitaire qui s'étale d'Avril jusqu'à la mi-Novembre.

Le tableau suivant résume tous les résultats obtenus par ces méthodes :

Tableau 18 : Indices climatiques à la station d'Aflou

Méthodes	Indice de Martonne	Gausson et Bagnouls	Euverte	Indice de Moral
Aflou	Semi-aride	D'Avril jusqu'à mi-Novembre	De mi-Mai jusqu'à Septembre	Semi-aride

9. Évaporation :

On dispose de mesures réalisées avec un évaporomètre Piche au niveau de la station d'Aflou pour la période 1990-2011. Les valeurs de l'évaporation sont indiquées dans le tableau 19.

Tableau 19 : Moyennes mensuelles de l'évaporation : période 1990-2011

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Année
Évaporation en mm	9,11	12,7	25,43	35,13	62	85,6	108,52	95,22	65,08	40,11	19,52	11,73	569,52

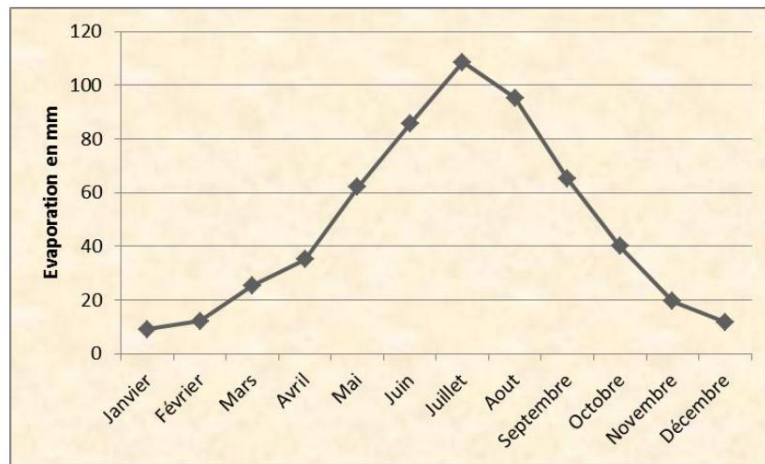


Figure 23 : Courbe d'évaporation moyenne mensuelle

La courbe de la figure 23 montre que l'évaporation la plus élevée est observée au mois de Juillet avec 108,52 mm, par contre, la plus faible est observée au mois de Janvier avec 9,11 mm.

10. Évapotranspiration :

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.

10.1 Évapotranspiration potentielle ETP :

L'évapotranspiration potentielle qui correspond à la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant.

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, on a appliqué les formules de Thornthwaite et de Bouchet.

10.1.1 Formule de Thornthwaite :

La formule THORNTHWAITE basée essentiellement sur les températures de l'air est la suivante :

$$ETP = 16 [10T/ I]^a \text{ (mm)}$$

Où :

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

T : La température moyenne mensuelle en C°.

I : L'indice annuel de chaleur, $I = \sum_{i=1}^{12} i$

i : L'indice mensuel de chaleur, $i = [T/5]^{1,514}$

a : L'exposant climatique, ($a = 0.016 I + 0.5$)

Les valeurs de ETP trouvées par cette formule devraient être corrigées à l'aide d'un facteur correctif noté K, celui-ci dépend du temps, du lieu de la station : **ETP corrigée = ETP.K**

Les résultats obtenus, pour la station d'Aflou, sont mentionnés dans le tableau 20 avec : I = 60,8 et a = 1,47. Donc $ETP_c = 766,74$ mm soit 278,68 % des précipitations.

Tableau 20 : Calcul de l'ETP selon la méthode de Thornthwaite à la station d'Aflou (1990-2011)

Aflou	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Année
ETP calculée	8,31	9,93	24,19	37,03	66,83	87,69	122,36	126,48	97,56	61,68	36,27	14,36	692,76
K	0,88	0,85	1,03	1,09	1,20	1,20	1,22	1,16	1,03	0,97	0,87	0,86	
ETP corrigée	7,32	8,44	24,91	40,37	80,20	105,22	149,28	146,72	100,49	59,83	31,56	12,35	766,74

10.1.2 Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des valeurs mesurée de l'évaporation par l'évaporomètre de Piche :

L'évaporomètre de Piche installé sous abri, est utilisé dans de nombreuses stations météorologiques. L'estimation de la valeur de l'évapotranspiration potentielle par l'évaporomètre de Piche, on utilise la formule de BOUCHET (Halimi) : $ETP = \alpha \cdot \lambda \cdot P$

Avec:

ETP : Évapotranspiration potentielle (mm).

P: Évaporation mesurée sous abri avec l'évaporomètre de Piche (mm).

α : Coefficient dépendant du type d'abri: abri standard = 0.37.

λ : Coefficient qui dépend de la température moyenne de la période considérée.

Les valeurs du coefficient λ en fonction de la température sont consignées dans le tableau 21.

Tableau 21 : Valeur de λ en fonction de la température

T °C	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
λ	1.81	1.87	1.92	1.98	2.04	2.11	2.17	2.25	2.32	2.40
T °C	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
λ	2.49	2.57	2.66	2.76	2.86	2.97	3.08	3.20	3.32	3.45
T °C	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0	28,0	29,0
λ	3.59	3.73	3.88	4.03	4.20	4.36	4.54	4.72	4.92	5.11

L'application de cette formule à la station d'Aflou a permis d'obtenir les résultats qui ont été consignés dans le tableau 22.

Tableau 22 : Les valeurs l'ETP mesurées selon la formule de Bouchet à la station d'Aflou (1990-2011)

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
T °C	3,9	4,4	8,05	10,75	16,05	19,3	24,2	24,75	20,75	15,2	10,6	5,65
λ	2,034	2,068	2,324	2,55	3,086	3,492	4,232	4,32	3,695	2,992	2,538	2,149
α	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
P	9,11	12,07	25,43	35,13	62	85,6	108,52	95,22	65,08	40,11	19,52	11,73
ETP	6,85	9,23	21,86	33,14	70,79	110,59	169,92	152,19	88,97	44,40	18,33	9,32
ETP annuelle	726,32											

Les résultats de l'évapotranspiration potentielle mensuelle calculée, pour la station d'Aflou, selon les formules de Thornthwaite et Bouchet présentent la même tendance d'évolution de l'évapotranspiration.

Concernant le mois de pointe, on constate que la plus grande valeur de l'évapotranspiration potentielle correspond au mois de Juillet (Figure 24).

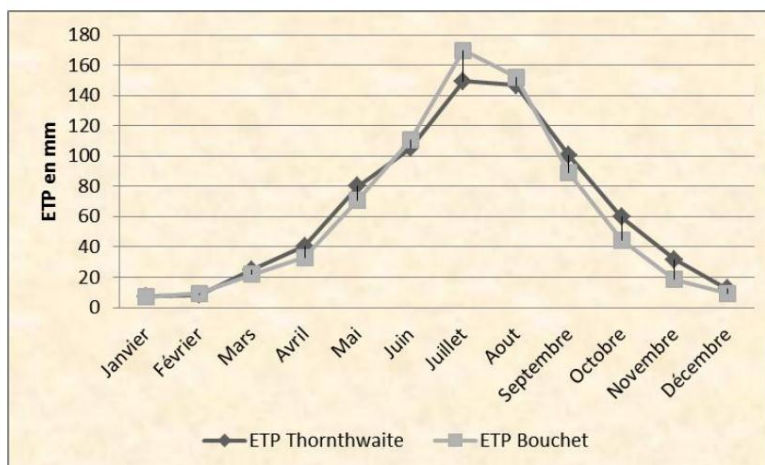


Figure 24: Évolution de l'ETP à l'aide des formules à la station d'Aflou

10.2 Évapotranspiration réelle ETR :

L'évapotranspiration réelle est une réponse, en termes de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'évapotranspiration potentielle, compte tenu de la quantité d'eau disponible.

L'évapotranspiration réelle est estimée à l'aide des formules de TURC, COUTAGNE, WUNDT et THORNTHWAITE.

10.2.1 Formule de Turc :

La formule de Turc permet d'évaluer directement l'évapotranspiration réelle annuelle d'un bassin à partir de la hauteur annuelle de pluie et de la température moyenne annuelle :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec :

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

ETR : Évapotranspiration réelle (en mm/an)

P : Hauteur annuelle de pluie (en mm)

T : Température moyenne annuelle (en °C)

Les résultats obtenus par l'application de la formule de Turc pour la station d'Aflou (1990/2011) sont rassemblés dans le tableau suivant :

Tableau 23 : Évapotranspiration réelle (méthode de Turc)

Station	T °C	P mm	ETR mm/an
Aflou	13,63	275,13	271,28

10.2.2 Formule de Coutagne :

Cette formule fait intervenir les précipitations moyennes annuelles (P en mm) et la température moyenne annuelle (T °C) comme suit :

ETR = P - λ P² avec : λ = 1 / 0.8 + 0.14T

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

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

T : La température moyenne annuelle, en C°.

Tableau 24 : calcul des paramètres de la formule de Coutagne

Station	T en °C	λ	1/8 λ	1/2 λ	P en m
Aflou	13,63	0,36	0,046	0,18	0 ,27513

D'après les calculs mentionnés dans le tableau 24, les données pluviométriques qu'on dispose ne répondent pas à la condition de la formule.

10.2.3 Méthode de Wundt :

Cette méthode permet d'obtenir à partir d'un diagramme le déficit d'écoulement en fonction de la température et des précipitations .Malheureusement, étant donné la structure de l'abaque, cette méthode est peu précise (figure 25).

On aura à partir de l'abaque **ETR Aflou = 290 mm** .

10.2.4 Méthode de Verdeil :

En 1988, Verdeil a établi un abaque bi-logarithmique pour les régimes semi-arides où les précipitations ne dépassent pas les 600 mm. L'abaque de Verdeil permet de calculer l'ETR en prenant en considération seulement la précipitation.

La projection des précipitations a donné les résultats suivants indiqués dans le tableau 25 :

Tableau 25 : Résultats de la méthode de Verdeil

Station	P mm	ETR mm
Aflou	275,13	260 soit 94,50 % des P

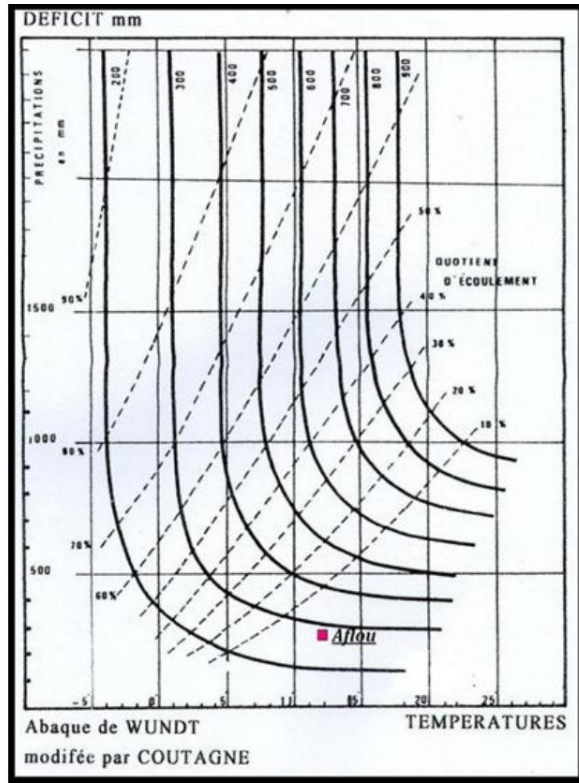


Figure 25 : Abaque de Wundt de la Station d'Aflou

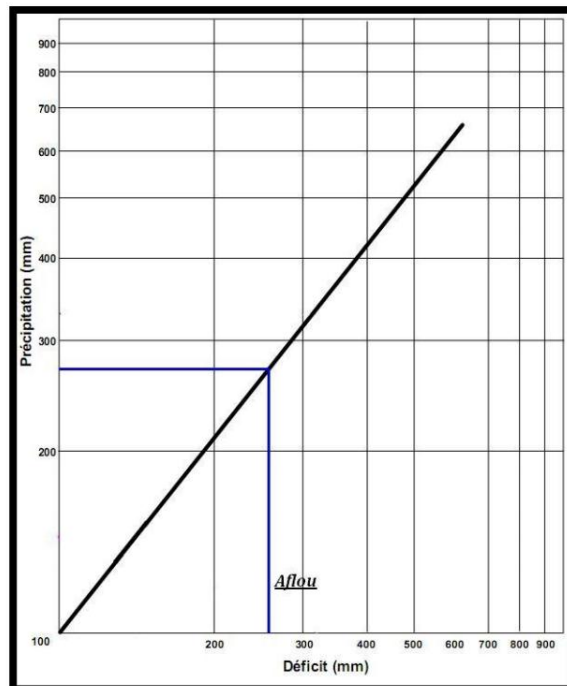


Figure 26 :Abaque de VERDEIL de la Station d'Aflou

10.2.5 Méthode de Thornthwaite :

La méthode de THORNTHWAITE donne une estimation de l'évapotranspiration réelle équivalente au déficit d'écoulement. Le bilan peut donner les caractéristiques du sol du point de vue sécheresse ou humidité.

Le bilan prend en considération :

- La précipitation P et l'ETP
- La réserve facilement utilisable RFU
- Le déficit agricole et l'excès d'eau

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 :

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

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 **30 mm** 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

Le principe de détermination de ce bilan est le suivant :

🌧 Si : $P > ETP$ → $ETR = ETP$ → $RFU = P - ETP$.

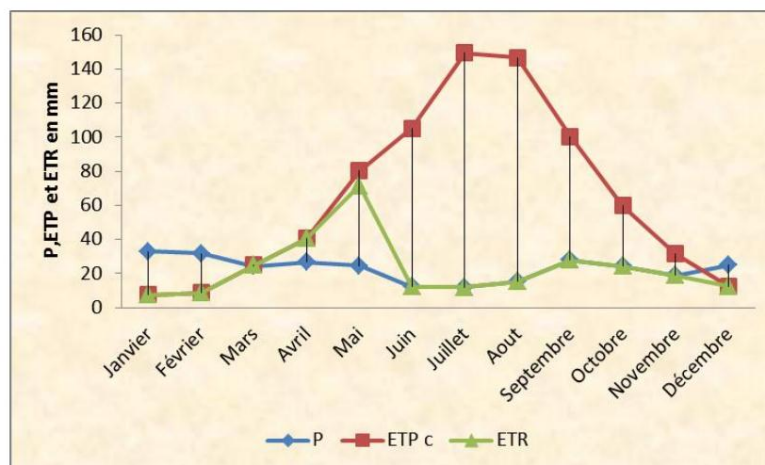
🌧 Si : $P = ETP$ → Les précipitations sont suffisantes pour alimenter le sol mais il n'y aura pas de surplus pour alimenter la RFU → $[RFU = 0]$.

🌧 Si : $P < ETP$ → 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.

Pour Aflou, on a pris **C-F = 10 %** (major partie est formée par des sables argileux) et la profondeur **h = 800 mm**.

La RFU calculée donne une valeur égale à 110 mm. ($RFU_{\min} = 0$ mm et $RFU_{\max} = 110$ mm).

- ❖ 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 - Février) et la seconde on a l'inverse (Mars - Novembre) (Voir la figure 27).



**Figure 27 : Graphe du bilan hydrique par la méthode de THORNWAITE
Station d'Aflou (1990-2011)**

- ❖ 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.
- ❖ 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.
- ❖ L'ETR est égale à 275,13 mm, soit 100 % des précipitations.

Les résultats de calculs sont mentionnés dans le tableau 26.

**Tableau 26 : Bilan hydrique d'après Thornthwaite à la station d'Aflou
Période (1990-2011)**

Mois	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	Année
P	24,83	33,06	31,76	24,14	26,64	24,68	12,15	11,94	15,1	27,82	24,22	18,79	275,13
ETPc	12,35	7,32	8,44	24,91	40,37	80,20	105,22	149,28	146,72	100,49	59,83	31,56	766,74
P-ETPc	12,47	25,73	23,31	-0,77	-13,73	-55,52	-93,07	-137,34	-131,62	-72,67	-35,61	-12,77	/
ETR	12,35	7,32	8,44	24,91	40,37	71,70	12,15	11,94	15,1	27,82	24,22	18,79	275,13
RFU	12,47	38,21	61,53	60,75	47,02	0	0	0	0	0	0	0	/
Déficit	0	0	0	0	0	8,49	93,07	137,34	131,62	72,67	35,61	12,77	491,61
Excédent	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

10.3 Discussion des résultats :

Le tableau 27 récapitule les différentes valeurs de l'ETP et l'ETR, obtenues par les différentes méthodes pour la station d'Aflou.

Les valeurs trouvées par les différentes méthodes sont relativement proches l'une de l'autre, ce qui nous a invité à prendre la moyenne de ces valeurs (tableau 27).

L'ETR moyenne est de l'ordre 274,10 mm soit 99,62% des précipitations à la station d'Aflou.

Tableau 27 : Valeurs de l'ETP et l'ETR obtenues par différentes méthodes

Paramètres	Méthode	Aflou
ETP mm	Thornthwaite	766,74
	Bouchet	726,32
	Moyenne	746,53
ETR mm	Turc	271,28
	Coutagne	/
	Wundt	290
	Verdeil	260
	Thornthwaite	275,13
	Moyenne	274,10

11. 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 :

$$P = E + R + I$$

Où :

P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm

E : Évapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm

R : Ruissellement moyen annuel en mm

I : Infiltration moyenne annuelle en mm

11.1 ruissellement superficiel :

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

$$R = P^3 / 3(ETPc)^2$$

L'application de cette formule a donné les résultats mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 28 : valeurs de ruissellement superficiel Période (1990-2011)

Station	P en mm	ETPc en mm	R en mm
Aflou	275,13	766,74	11,80

Le ruissellement superficiel est de l'ordre 11,80 mm soit 4,28 % des précipitations à Aflou.

11.2 Infiltration :

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

$$P = ETR + R + I \rightarrow I = P - (ETR + R)$$

L'application de cette formule pour la station d'Aflou a donné des résultats mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau 29 : L'infiltration par les différentes formules de la Station d'Aflou

Méthode	P	ETR	R	I
Thornthwaite	275,13	275,13	11,80	-11,80
Turc	275,13	271,28	11,80	-7,95
Wundt	275,13	290	11,80	-26,67
Verdeil	275,13	260	11,80	3,33

D'après les résultats de l'infiltration, seule la méthode de Verdeil donne une valeur positive pour la station d'Aflou avec une valeur de 3,33 mm soit 1, 21% des précipitations.

Les différentes méthodes de calcul de l'infiltration ne tiennent pas compte ni de la lithologie ni de la pente du terrain. Les résultats restent généraux et ne reflètent pas la réalité. Elles doivent être prises avec prudence.

Partie 02 : Hydrologie

Introduction :

Le comportement hydrologique d'un bassin versant dépend de la conjugaison des paramètres caractérisant les apports atmosphériques, qui sont constitués dans une grande partie par les pluies, et des paramètres physico - géographiques qui sont propres à chaque bassin, la constitution du sol, la couverture végétale, les pentes et les réseaux hydrographiques ainsi que les facteurs climatiques qui rentrent dans le phénomène d'évaporation.

La nécessité de comprendre l'évolution des données hydrométriques recueillies au niveau d'une station de jaugeage, servira d'une part l'évaluation des apports liquides à différentes échelle de temps, et d'autre part l'analyse de la variabilité événementielle de l'écoulement.

I. Différents bassins hydrographiques en Algérie :

Selon la nouvelle politique de l'eau, le territoire algérien est découpé en cinq régions en bassins hydrographiques (figure 28) :

- Oranie_Chott - Chergui
- Chellif_Zahrez
- Algérois_Hodna_Soummam
- Constantinois_Seybouse_Mellègue
- Sahara

Le découpage hydrographique adopté a été essentiellement basé sur les critères suivants :

- Les caractéristiques géographiques et naturelles de la région.
- Le groupement des bassins versants et sous-bassins hydrographiques, entre lesquels existent des nécessités de transfert.

1. Le bassin hydrographique Oranie_Chott- Chergui :

La région hydrographique Oranie_Chott- Chergui couvre une superficie d'environ 77 169 Km², soit le tiers du Nord de l'Algérie. Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est par la région Chéllif_Zahrez, à l'Ouest par le Maroc et au Sud par le bassin de Sahara. La pluviométrie moyenne annuelle de la région Oranie_Chott- Chergui est de 318 mm, soit un volume d'eau précipitée de 24 600 Millions de mètre cube, alors que les écoulements annuel en eau de surface sont estimés à environ 971 Millions de mètre cube.

2. Le bassin hydrographique Chellif_Zahrez :

Le bassin hydrographique Chellif_Zahrez couvre une superficie d'environ 56 227 Km². Il est limité à l'Ouest par Oranie - Chott- Chergui, à l'Est par Algérois-Hodna-Soummam, au Nord

par le bassin de Méditerranée et au Sud par le Sahara.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 418 mm, soit un volume d'eau précipitée de 23 500 Millions de mètre cube. Alors les écoulements superficiels annuels estimés à environ 1947 Millions de mètre cube .

3. Le bassin hydrographique Algérois_Hodna_Soummam :

La région hydrographique Algérois-Hodna-Soummam couvre une superficie d'environ 47 908 Km² .elle est limitée par la région Chellif-Zahrez à l'Ouest et la région Constantinois Seybouse-Mellègue à l'Est, au Nord par la mer Méditerranée et au Sud par le bassin de Sahara.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 422 mm, soit 21 200 Millions de mètre cube d'eau par an, alors que les écoulements annuels en eau de surface sont estimés à environ 4 303 Millions de mètre cube.

4. Le bassin hydrographique Constantinois-Seybouse-Mellègue :

Cette région couvre une superficie d'environ de 44 0719 Km². Elle est située entre la région Algérois_Hodna_Soummam et la Tunisie, au Nord limitée par la mer Méditerranée et au Sud par le bassin de Sahara. Cette région reçoit une pluviométrie annuelle de l'ordre 26 000 Millions de mètre cube et un apport annuel moyen de 5595 Millions de mètre cube.

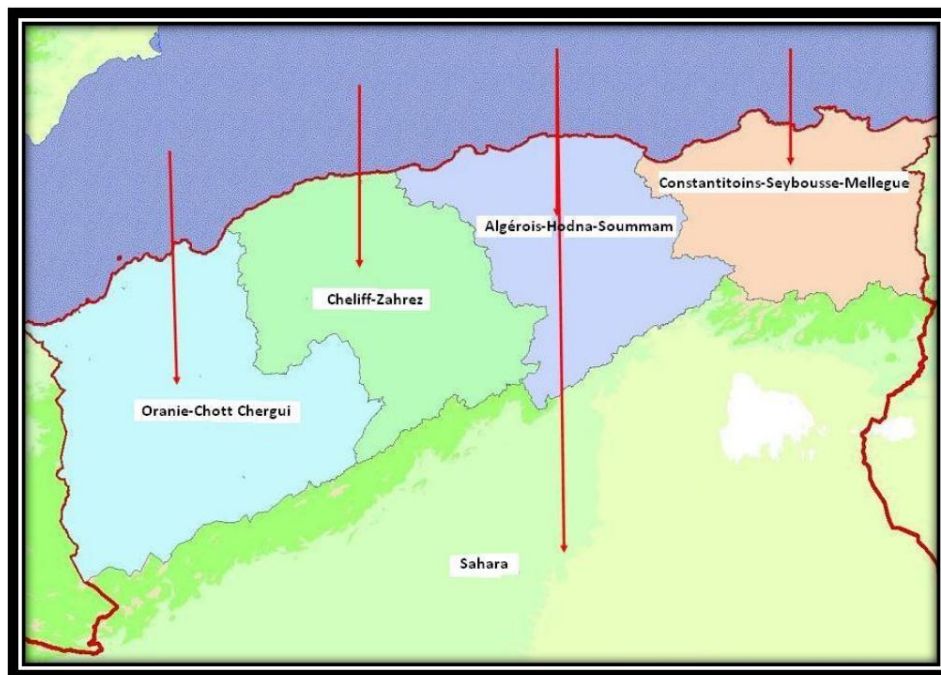


Figure 28 : Organisation des grands bassins versants du Nord de l'Algérie

(Source ABH)

II. Présentation du site étudié :

Sur le plan hydrographique, les cours d'eau ou oueds de l'Atlas Saharien suivent une ligne de pente insensible à l'œil au milieu de la steppe étendue et s'épandent souvent dans des bassins fermés et vont alimenter les dayas et les chotts situés plus au Nord. Tous ces oueds sont à sec la plupart du temps. Une exception est l'Oued Sebgag située à l'Ouest d'Aflou (figure 29) qui est l'unique de l'Atlas saharien Central qui se déverse dans la mer Méditerranée et qui constitue avec l'oued Berkana la source de l'un des plus importants cours d'eau d'Algérie : le Chélif.

Un autre oued important, l'Oued Djeddi, naît sur le versant méridional de l'Atlas au Sud d'Aflou, et se déverse dans le Chott Melrhir au Sud de Biskra, après avoir longé le pied de l'Atlas.

L'Oued Djeddi prend source de l'amont du l'Oued M'zi et l'Oued Seklafa qu'au son niveau une station hydrométrique est établie.

A. l'Oued Sebgag-Berkana :

L'objectif de cette étude hydrologique intéresse les débits relatifs aux périodes de (1966-1967) et (1981-2007).

- ❖ Durant la période 1966-1967 une station hydrométrique a été implantée par les services de la DHW (Direction de l'hydraulique de la Wilaya de Tiaret) à une centaine de mètres au Sud de Guern- Arif, sur l'emplacement de l'ancienne retenue. Cette situation a été choisie car elle permet de prendre en compte l'ensemble des sources émergeant dans la dépression de Sebgag. Les mesures de débit ont été effectuées journalièrement du premier Novembre 1966 au 31 Août 1967.

Il n'a pas été établi de courbe de tarage de la station et on n'a aucune indication sur les hauteurs d'eau (pas plus d'ailleurs que sur les méthodes utilisées pour l'estimation des débits).

- ❖ Pour la seconde période (1981-2007) des relevés périodiques ont été effectués par l'A.N.R.H (Alger, Blida et Djelfa) et contrôlés par la station hydrométrique non étalonnée de Gueltat Sidi Saad.

Les caractéristiques essentielles de la station sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 30 : caractéristiques de la station hydrométrique de Gueltat Sidi Saad

Code de la station	Nom de la station	Oued	Coordonnées Lambert		Mise en service	Équipements
			X	Y		
010201	Gueltat Sidi Saad	Sebgag	492900	110650	01/09/1973	*Batterie d'échelle limnométrique *Limnigraphe pneumatique (à pression)

Le sous- bassin de l'oued Sebgag-Berkana constitue l'amont de bassin hydrographique de Chellif-Zahrez. L'oued Cheliff qui s'étend sur une distance de 800 Km traverse le bassin versant le plus important du pays avec une superficie de 43 750Km². Il est le seul cours d'eau algérien, qui prend sa source dans l'Atlas saharien du l'Oued Sebgag, près d'Aflou dans les Monts du Djebel Amour. (Figure 30)

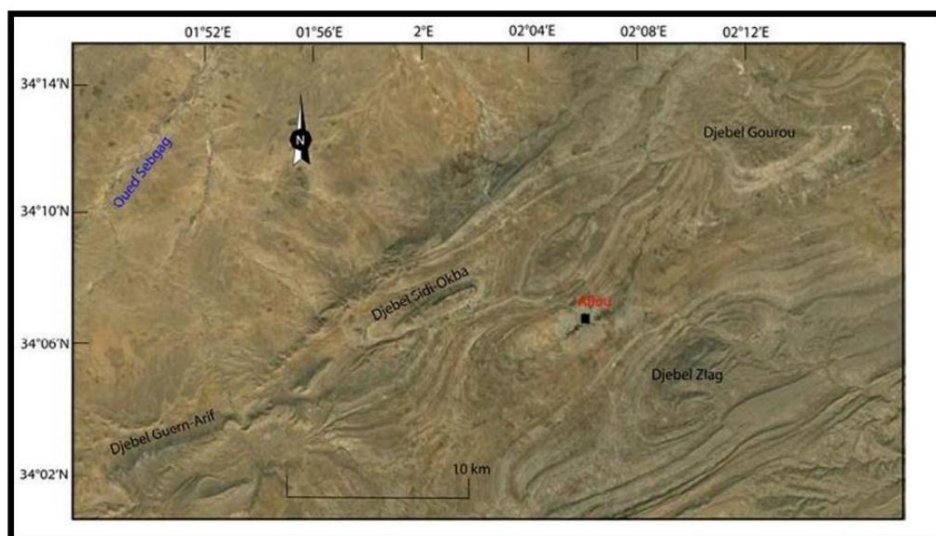


Figure 29: Situation des principaux Djebels et Oued dans la région d'Aflou (Monts du Djebel Amour) Photo : Google Earth

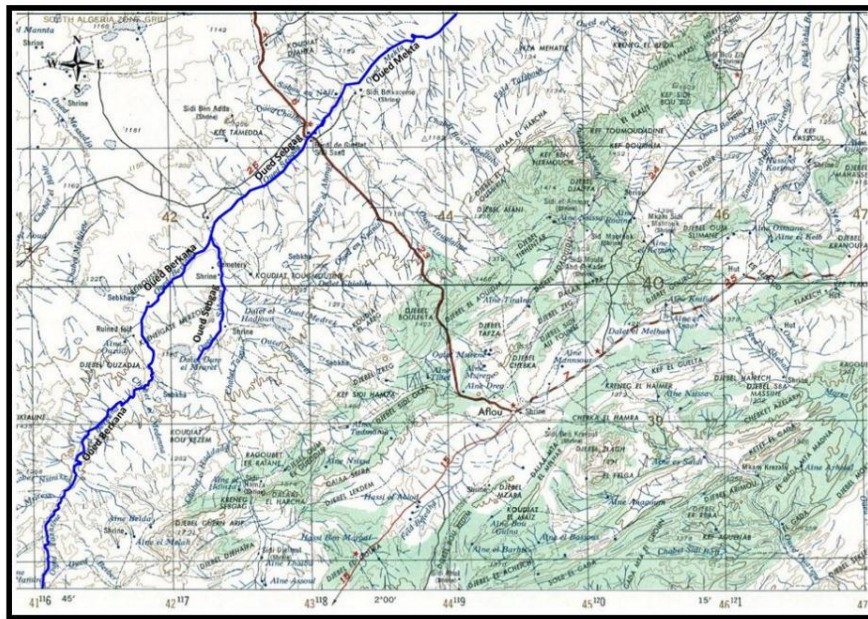


Figure 30 : Tracé hydrographique de l'Oued Sebgag-Berkana

1. Caractéristiques physiques :

1.1 La forme de bassin :

Cette forme qui peut être traduite par l'indice de compacité de « Graveluis » K_C , a également une influence certaine sur l'écoulement ; elle détermine, dans une certaine mesure, l'allure de l'hydrogramme de crue. Un bassin très allongé ne réagira pas, toutes choses égales d'ailleurs, de la même manière qu'un bassin de forme ramassée (M.Roche, 1963).

L'indice de compacité (K_C) s'établit en comparant le périmètre stylisé du bassin (P) à celui d'un cercle qui aurait la même surface (A). Soit :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

À partir de la valeur de K_C , on peut caractériser la forme du sous bassin versant comme suit :

- $K_C \leq 1$ ———> Bassin versant de forme circulaire
- $K_C > 1$ ———> Bassin versant allongé

Dans notre cas $K_C > 1$, le sous- bassin versant Sebgag-Berkana correspond à un bassin Allongé favorisant un écoulement lent des eaux de ruissellement et une érosion importante.

Tableau 31 : Indice de compacité de sous - bassin versant

Sous –bassin versant	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Indice de compacité Kc
Sebgag- Berkana	777,73	129,61	1,30

(Source : ANRH 2005)

1.2 Les Dimensions du Rectangle équivalent :

L. Roche, 1963 compare le bassin versant à un rectangle de même surface, de même indice de compacité, de même courbe de fréquence altimétrique et de même conditions d'écoulement.

La longueur et la largeur du rectangle sont obtenues à l'aide des relations suivantes :

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \quad l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right]$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en km

l : Largeur du rectangle équivalent en km

K_C : Indice de compacité

A : Superficie du bassin versant en km²

Les valeurs de la longueur équivalente et de la largeur équivalente sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 32 : Largeur et longueur équivalente

Sous –bassin versant	Surface (Km ²)	Périmètre (Km)	Kc	Longueur équivalente (Km)	Largeur équivalente (Km)
Sebgag- Berkana	777,73	129,61	1,3	48,80	15,93

(Source : ANRH 2005)

1.3 Densité de drainage :

Pour affiner l'analyse, on a effectué le calcul de la densité de drainage total pour le sous-bassin de Sebgag-Berkana.

$$Dd = \frac{\sum Lx}{A}$$

Lx : est la longueur cumulée de toutes les rivières d'ordre x (km)

A : surface du bassin versant (km²)

Tableau 33: Densité de drainage de sous- bassin versant

Sous -bassin	L en Km	A en Km ²	Dd en Km/Km ²
Sebgag- Berkana	544,27	777 ,73	0,70

(Source : ANRH 2005)

2. Hydrométrie de la zone d'étude :

2.1 Variabilité des débits mesurés à la station :

Étant donné l'absence des jaugeages journaliers des débits, on dispose d'une chronique discontinue des débits uniquement de l'Oued Sebgag pour la période (1981-2007).

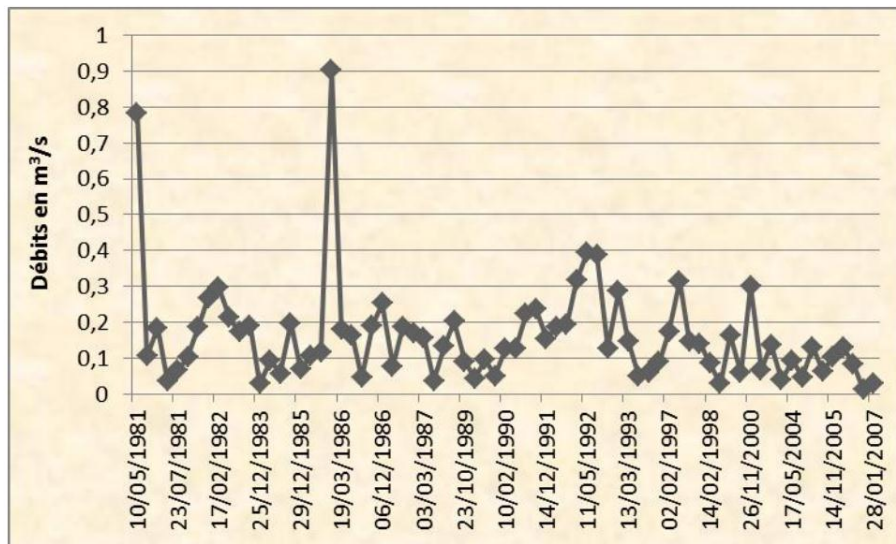


Figure 31 : Variabilité des débits de l'oued Sebgag

Cette série de débits présente une maximale de 0,904 m³/s enregistrée le 10/03/1986 et une minimale de 0,012 m³/s enregistrée le 13/11/2006 avec une moyenne de 0,16 m³/s (figure 31).

La courbe des débits présente des variations remarquables d'une mesure à l'autre, ça seraient dues à la variabilité de la pluviosité.

2.2 Les crues de l'oued Sebgag :

Une Liste des crues de l'oued Sebgag est délivrée par l'ANRH de Djelfa est reportée dans le tableau 34.

Tableau 34: liste des crues de l'Oued Sebgag

Date	Hauteur maximale en cm	Date	Hauteur maximale en cm
18/09/1980	25	18/10/1988	60
27/09/1980	76	31/08/1989	30
14/03/1984	38	25/04/1990	22
19/05/1985	30	09/05/1990	36
06/03/1986	50	15/03/1991	20
16/09/1986	370	19/10/1991	30
17/09/1986	170	25/10/2007	60
02/07/1987	50	26/10/2007	60
03/10/1987	25	01/04/2008	100
04/10/1987	45	08/09/2008	150

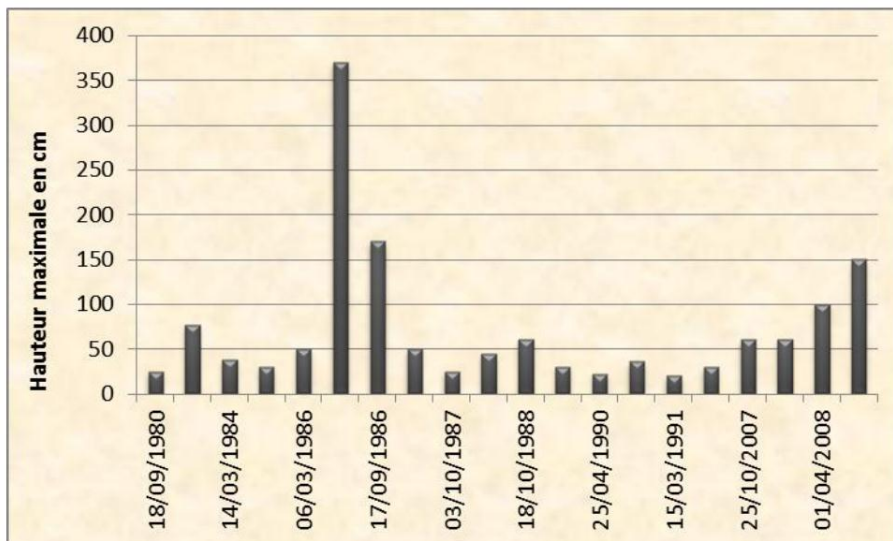


Figure 32 : Histogramme des hauteurs de crues

La hauteur maximale des crues pour cette série est marquée le 16-09-1986 avec une valeur de 370 cm (figure 32) qui a provoquée des catastrophes au niveau de la région.

2.3 Distribution des débits moyens mensuels :

Les débits moyens mensuels de la période 1966-1967 sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 35 : Débits moyens mensuels de l'Oued Sebgag

	Débits mensuels minima	Débits mensuels maxima	Débits mensuels moyens
Septembre	-----	-----	-----
Octobre	-----	-----	-----
Novembre	0,14	0,23	0,23
Décembre	0,16	0,17	0,17
Janvier	0,16	0,25	0,18
Février	0,17	0,22	0,19
Mars	0,16	0,2	0,18
Avril	0,094	0,22	0,16
Mai	0,04	0,2	0,069
Juin	0,044	0,094	0,058
Juillet	0,032	0,069	0,048
Août	0,04	0,069	0,053

Du maximum observé de Janvier à Avril les débits varient assez peu, restant compris entre 0,19 et 0,16 m³/s. la rupture observée en juin pour les débits maxima apparait en Mai, les débits tombant ensuite à 0,069 m³/s. la décroissance se poursuivra jusqu'à juillet où un maximum de 0,048 m³/s est noté (figure 33).

Le débit moyen mensuel le plus fréquent (30% des observations), suivi de 0,048 (20% des observations) les débits les moins fréquents (0 à 5% des observations) sont compris entre 0,1 et 0,15 m³/s.

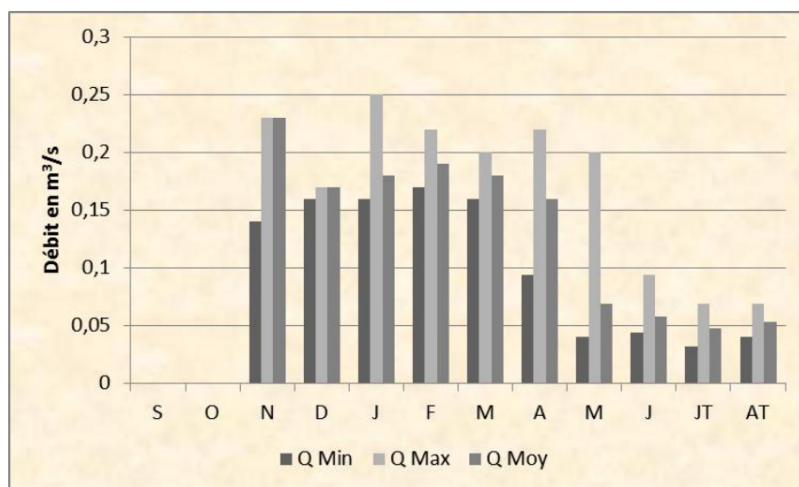


Figure 33 : les débits caractéristiques de l'oued Sebgag (1966-1967)

2.4 Courbe des débits classés :

La courbe des débits classés qui est une analyse couramment utilisée dans le domaine de l'hydrologie de surface, est employée pour mettre en évidence des variations de régime. Les variations peuvent alors être expliquées, soit par fuite d'eau vers l'extérieur du système soit par apport supplémentaire d'eau vers le système.

Cette courbe est construite en portant, pour une classe de débit donné le nombre de jours pendant lesquels ce débit est observé.

La méthode repose sur un classement et une représentation des débits journaliers sous la forme d'une courbe de distribution des fréquences (tableau 36).

Dans le cas présent, ne possédant qu'un cycle nous avons tenté d'appliquer la méthode pour essayer de détecter toute hétérogénéité sur la droite des débits classés.

Tableau 36 : Fréquences des débits moyens journaliers

Classe des débits en m ³ /s	% de l'année	% cumulé
≤ 0,040	2,64	2,64
[0,040 - 0,050]	9,57	12,21
[0,050 - 0,060]	11,55	23,76
[0,060 - 0,070]	8,58	32,34
[0,070 - 0,080]	2,31	34,65
[0,080 - 0,090]	2,97	37,62
[0,090 - 0,1]	2,31	39,93
[0,1 - 0,15]	3,63	43,56
[0,15 - 0,20]	50,82	94,38
[0,20 - 0,25]	5,61	99,99

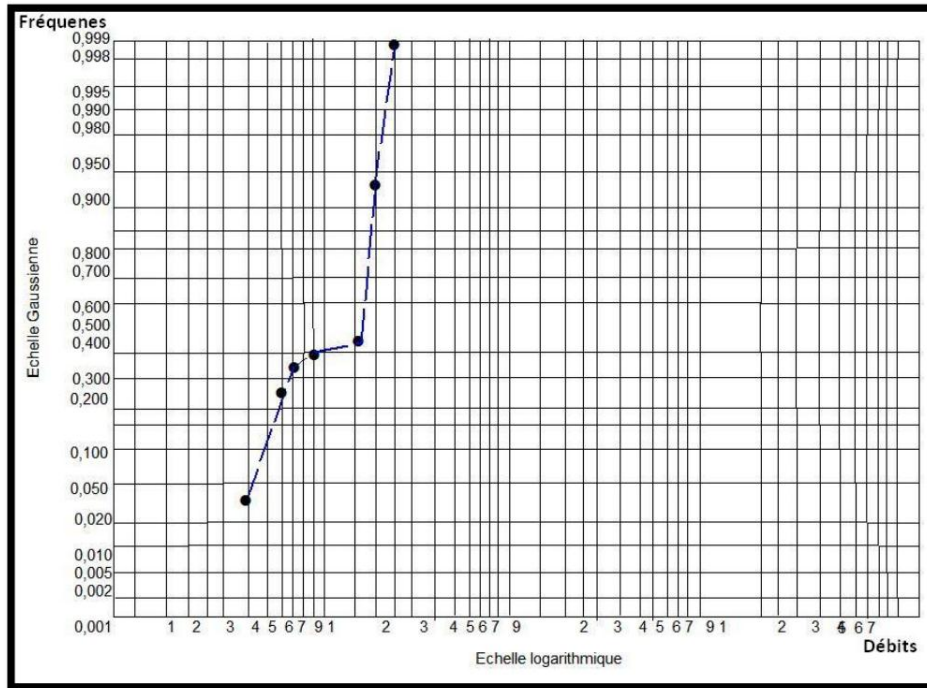


Figure 34 : Courbe des débits cumulés

La courbe des fréquences cumulées des débits de l'oued Sebgag montre deux principales ruptures de pentes (figure 34). La première rupture à $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ où La diminution des débits en période sèche (de Mai à Aout) s'expliquerait à la fois par le tarissement de la nappe en période de non alimentation pluviale et par une reprise par évaporation et évapotranspiration aussi bien sur l'oued lui-même que sur la nappe qui lui est associée.

La deuxième rupture est marquée à partir de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, cette série correspond à une période humide (de Novembre à Avril) correspond à la mise en fonction de trop plein.

2.5 Étude des courbes de récession :

Il est connu en hydrologie de surface que l'hydrogramme d'une crue se décompose en quatre parties:

- Courbe de concentration
- Pointe
- Courbe de décrue
- Tarissement (d'après G.CASTANY en 1963, REMINIERAS 1976).

L'analyse des courbes de récession a été proposée par MANGIN (1970) dans le but d'estimer l'importance des ressources en eau et certaines caractéristiques d'un système karstique. Les principales caractéristiques d'un système sont :

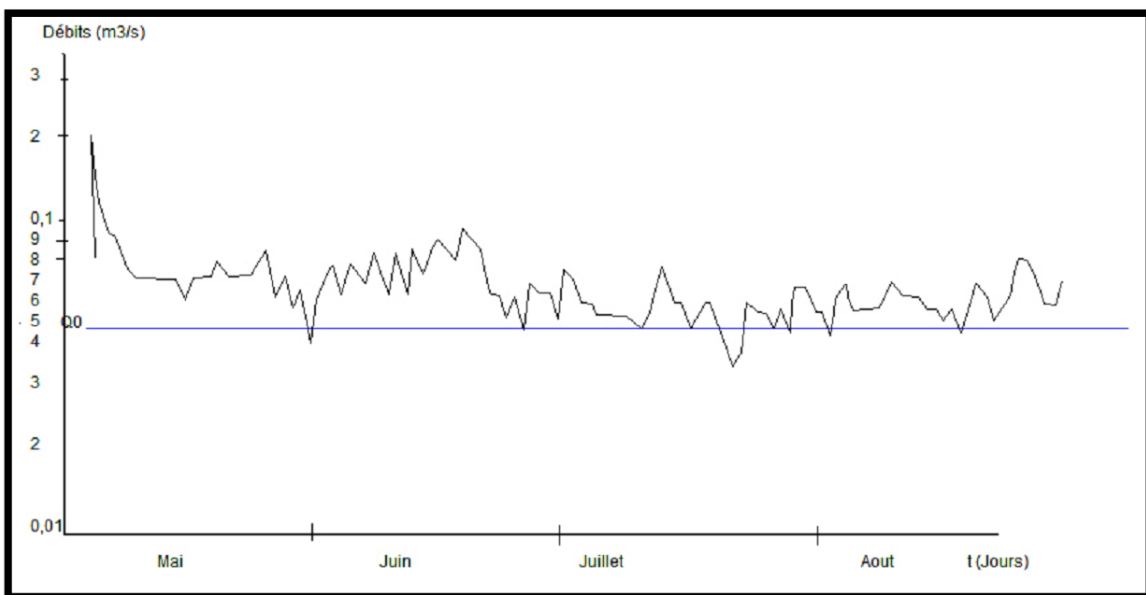
- α coefficient de tarissement, il rend compte de l'inertie du système. Typiquement, les valeurs de α vont de 10^{-3} j^{-1} pour un système très inertiel, mal drainé, donc peu karstifié, à 10^{-1} j^{-1} pour un système peu inertiel, donc très karstifié.
- η coefficient d'infiltration, il rend compte de la vitesse d'infiltration. η varie théoriquement entre 0 et 1, et l'infiltration est d'autant plus rapide que η tend vers 1.
- ε coefficient d'hétérogénéité de l'écoulement. Lorsque ce coefficient est élevé, il caractérise un système où l'infiltration rapide prédomine, alors que lorsqu'il est faible, il caractérise un système où l'infiltration est lente et/ou l'influence d'un aquifère épikarstique.
- Vd le volume dynamique est le volume des réserves du karst noyé qui détermine les variations de débit à l'exutoire en l'absence de crue.

De plus, à partir de l'analyse des courbes de récession, les systèmes karstiques peuvent être classés et comparés, en fonction des caractéristiques de leur zone d'infiltration et de leur zone noyée. Les deux paramètres utilisés sont :

- k ce coefficient traduit le pouvoir régulateur d'un aquifère. Le coefficient k correspond à la capacité d'un système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps. Il renseigne ainsi sur l'importance du karst noyé. Ce rapport est le rapport du volume dynamique sur le transit annuel moyen du système. Dans le domaine karstique, k est généralement inférieur à 0.5 et une valeur tendant vers 0 indique un pouvoir régulateur faible.

- **i** ce coefficient traduit les retards à l'infiltration d'un aquifère. Le coefficient **i** donne ainsi une idée du degré de karstification d'un système. Il est d'autant plus faible que le système est bien drainé, que la karstification est forte. Au contraire, un **i** fort indique un mauvais drainage et/ou l'influence d'un aquifère épikarstique.

Deux séries de relevés sont disposés, les premiers effectués par les services de l'ANRH en 1967 (Figure 35) et les autres en 1981 par Monsieur Stamboul Madani.



**Figure 35 : courbe de tarissement de l'oued Sebgag 1967
(D'après Stamboul M)**

Le Haut Bassin de Sebgag qui alimente les sources est implanté sur des formations gréseuses, la plus grande partie de la circulation des eaux se faisait au niveau des fissures. Les valeurs moyennes des principaux paramètres sont présentées (tableau37).

Tableau 37 : Principaux paramètres (D'après Stamboul M)

	De Mai à fin août 1967	Début Avril à fin Août 1981
Temps t_i (jours)	26	92
débit total Q_t m³/s	0,20	0,188
débit de départ du tarissement Q_{R0} m³/s	0,05	0,055
débit d'infiltration q_0 m³/s	0,150	0,133
Coef. de tarissement α	0,00205	0,0024
Coef. d'infiltration η	0,0385	0,01087
Coef. d'hétérogénéité d'écoulement ε	0,025	0,0106
Volume dynamique V_d 10⁶ m³/s	1,82	1
Volume de transit V_t 10⁶ m³/s	4,22	4,22
Coef. des retard d'infiltration i	0,97	0,97
Coef. régulateur K	0,497	0,469

Les résultats obtenus à partir de l'analyse des deux périodes sont très proches (à l'exception peut-être de η et de ε qui sont directement influencés par la durée de la décrue 26 jours pour la première et 92 jours pour la seconde).

Les coefficients de tarissement sont faibles, ils traduisent soit l'importance des réserves, soit ce qui est plus vraisemblable, que l'aquifère est directement lié au milieu gréseux. Les valeurs obtenues pour i et k indiquent que le système de Sebtag correspond à un bassin complexe (figure 36).

Dans les faits, nous savons que le bassin du Sebtag est implanté sur un milieu poreux (grès) comportant un nombre important de fissures, il n'y a pas de réseau spéléologique et à priori de système noyé à l'aval.

Le bassin du Sebtag comporte certes une circulation en milieu fissurai, mais celui-ci est loin de pouvoir être assimilé à un karst. Dans ces conditions, il nous paraît que les méthodes de Maillat et de Tison lorsque l'on a affaire à des grès sont les plus adopter pour nous apporter des résultats proches de la réalité.

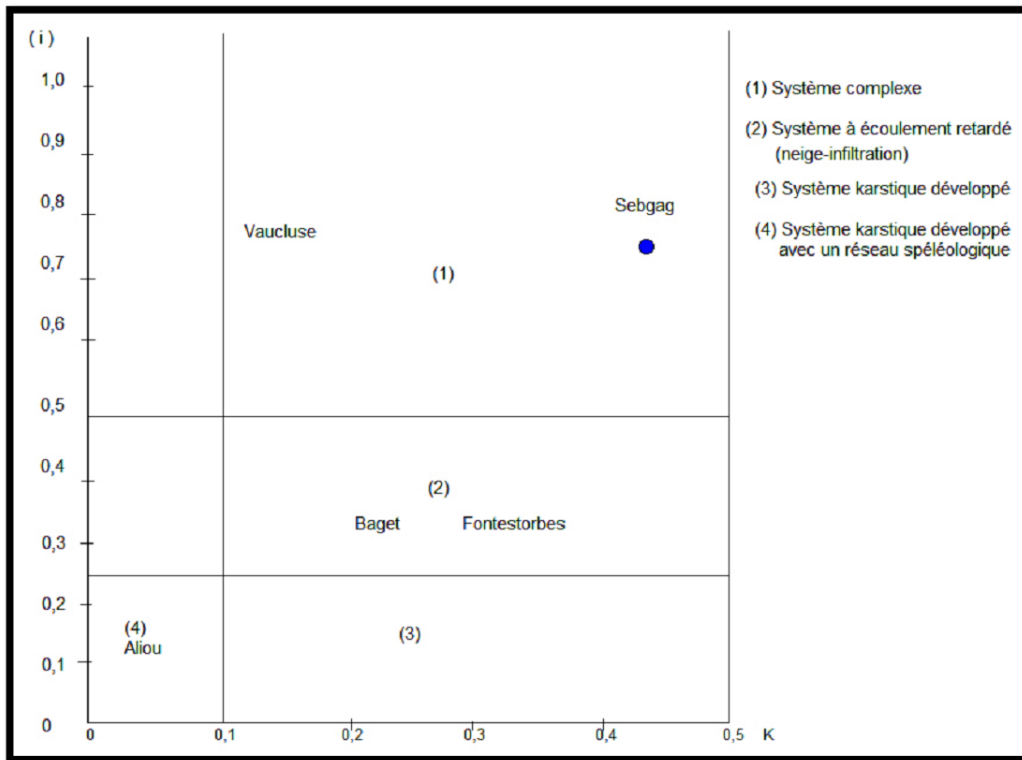


Figure 36 : Classification des systèmes karstiques défini par A. Mangin (1975)

2.6 Analyses corrélatoires:

L'étude est portée sur les pluies et les débits journaliers enregistrés durant la période allant du Novembre 1966 à Aout 1967.

Dans notre cas la série est relativement courte, nous avons donc pris $m = 101$ jours, tel que $m = n / 3$; le choix de cet intervalle n'est pas fondé sur des concepts théoriques, mais il a été constaté que la troncature (m) doit être inférieure à la moitié du nombre de valeurs de la période d'étude et préférentiellement à $n/3$ (A. Mangin 1984).

2.6.1 Analyses simples :

a) Chronique de pluie :

Pour la chronique du cycle hydrologique de 1966 à 1967, le corrélogramme simple à court terme décroît rapidement et le coefficient d'autocorrélation qui est de 0,1 est atteint au bout du 2^{ème} jour et oscille ensuite autour de zéro traduisant ainsi le caractère quasi aléatoire de la pluie (figure 37).

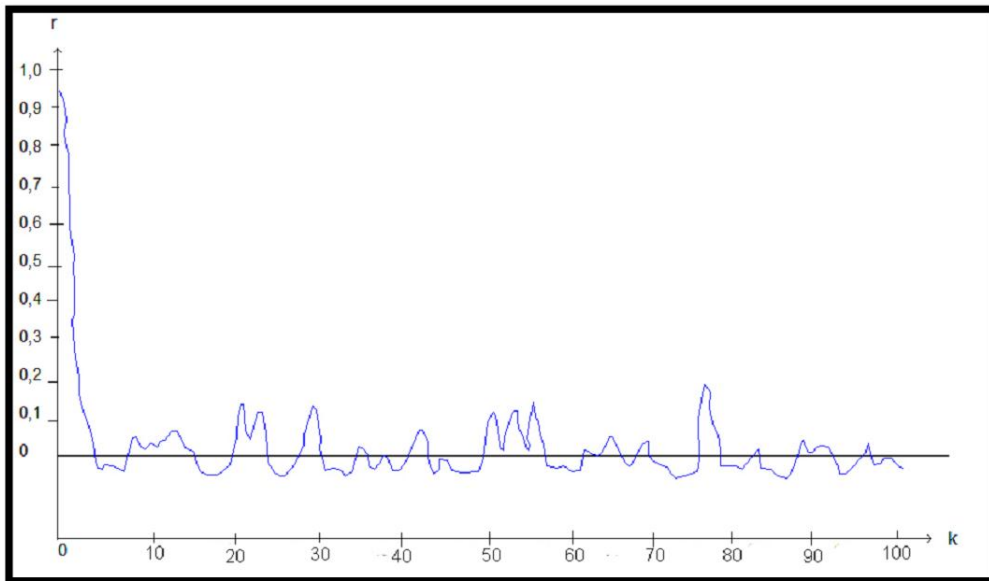


Figure 37 : Corrélogramme pluie 1966-1967

Le spectre montre que la répartition des pluies n'est pas tout à fait monotone ; une légère tendance correspondant à des variations périodiques : 63 jours, 34 et 11 jours. Ce qui nous laisse penser à la présence d'une légère structuration du signal (pluie) (figure 38).

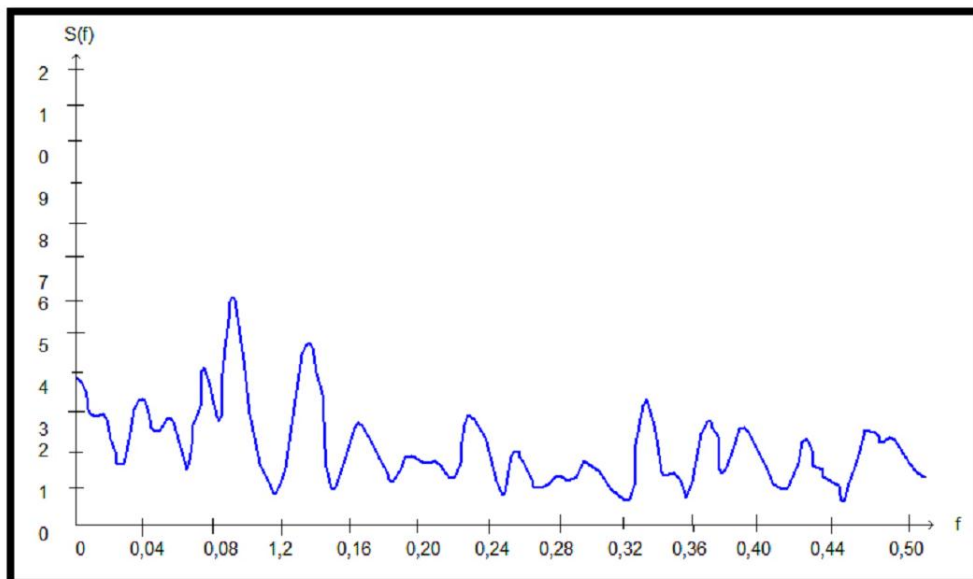


Figure 38 : Spectre de densité de variance –pluie (1966-1967)

b) Chronique de débit :

Le corrélogramme à court terme présente une décroissance lente où la valeur 0,20 est atteinte au bout de 78 jours (figure 39).

La forte dépendance des événements caractérise un système structuré connaissant un effet mémoire important.

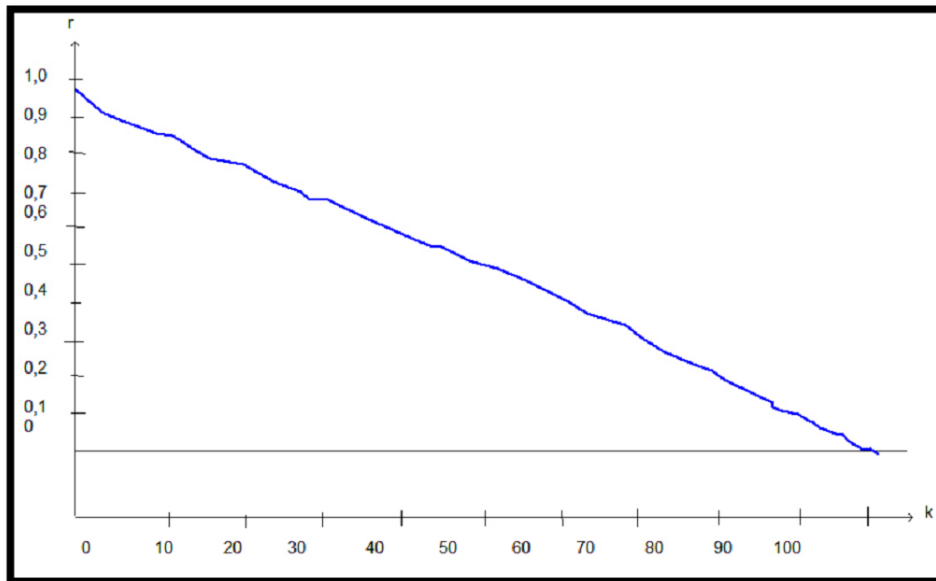


Figure 39 : Corrélogramme -débit (1966-1967)

Le spectre présente une bande très étroite avec une fréquence de coupure de 0,07 ce qui indique que le système modifie la plus part des informations de la fonction d'entrée (pluie). Le temps de régulation correspondant à la durée de l'influence du signal d'entrée est de 68 jours, il traduit l'inertie du système et confirme l'importance des réserves (figure 40).

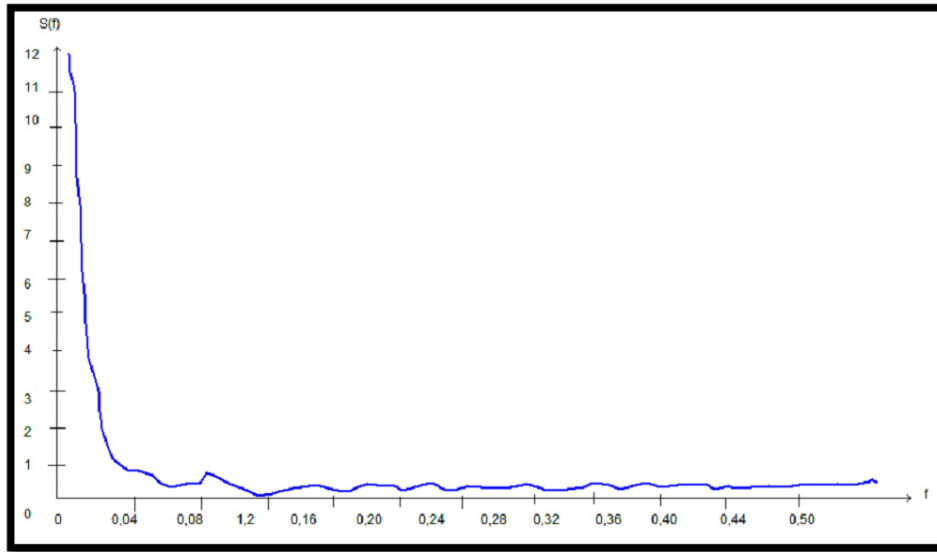


Figure 40 : Spectre de densité de variance (débit 1966-1967)

2.6.2 Analyse croisée :

Le corrélogramme croisé fait apparaître que le maximum d'inter corrélation est de 0,10 obtenu pour un décalage d'une journée. Il présente une forme pointue et en même temps plusieurs variations de pente, ce qui lui confère un certain étalement. La réponse est donc composite, témoignant de différentes sources d'alimentation.

Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la première partie (forme pointue) correspond au ruissellement de surface (négligeable), auquel s'ajoute un écoulement souterrain (partie étalée) avec un pouvoir régulateur important (Figure 41).

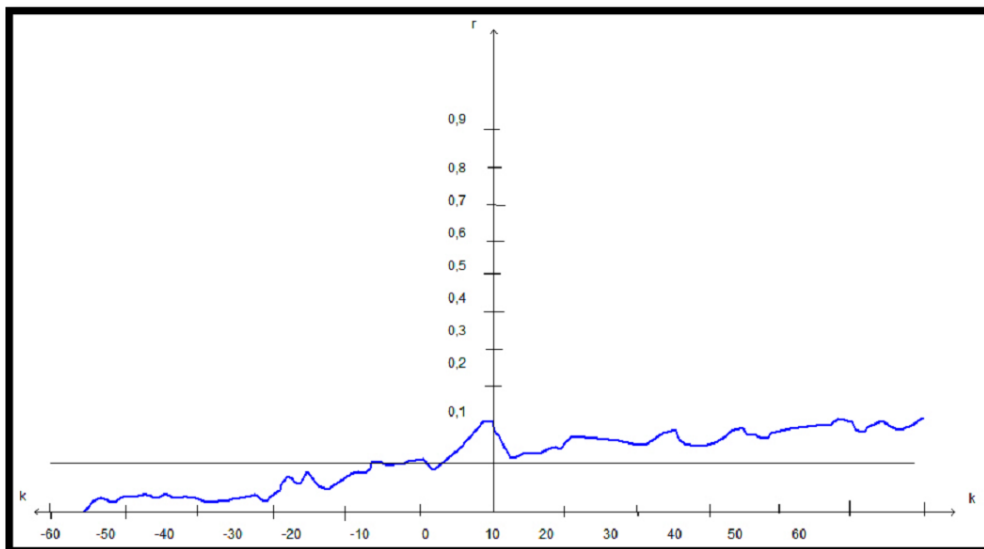


Figure 41 : Corrélogramme croisé (Pluie-Débit : 1966-1967)

B. L'Oued Seklafa :

Situé au Sud-Est d'Aflou, il constitue l'affluent le plus important de l'Oued M'Zi (d'une longueur de 40 kilomètres, il draine un bassin de 775,6 km²).

Le débit de l'Oued est contrôlé par une station hydrométrique implantée au niveau de Seklafa, situation qui lui permet de prendre en compte l'ensemble des eaux venant de l'amont. Cette station hydrométrique fonctionnait depuis 1971 avec des lacunes importantes pour les années 1983 et 1984.

L'Oued M'zi qui constitue la branche principale du système prend naissance à 1600 mètres d'altitude et draine un bassin de 4500 km², la longueur de l'oued principale est de 106 km. Les deux principaux sous bassins sont l'Oued Seklafa et celui de Tadjemout.

Pour l'étude hydrologique de cet oued, on dispose des relevés concernant les débits moyens mensuels, minima et maxima portant sur la période 1975-1986.

1. Distribution des débits moyens mensuels :

Les débits moyens mensuels sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 38 : Débits moyens mensuels

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
Moy . en m ³ /s	1,24	0,62	0,66	0,16	0,42	0,75	0,37	0,155	0,29	0,32	0,27	0,13

Le débit chute de 1,24 m³/s en Septembre à des valeurs inférieures à 1 m³/s pour le reste de l'année. Le minimum est observé en Décembre 0,16 m³/s. De Janvier à Mars le débit oscille autour d'une moyenne de 0,5 m³/s pour atteindre un minimum en Avril 0,16 m³/s.

Pendant la période sèche le débit varie entre un maximum de 0,32 m³/s en Juin et un minimum de 0,13 m³/s observé en Aout (figure 42).

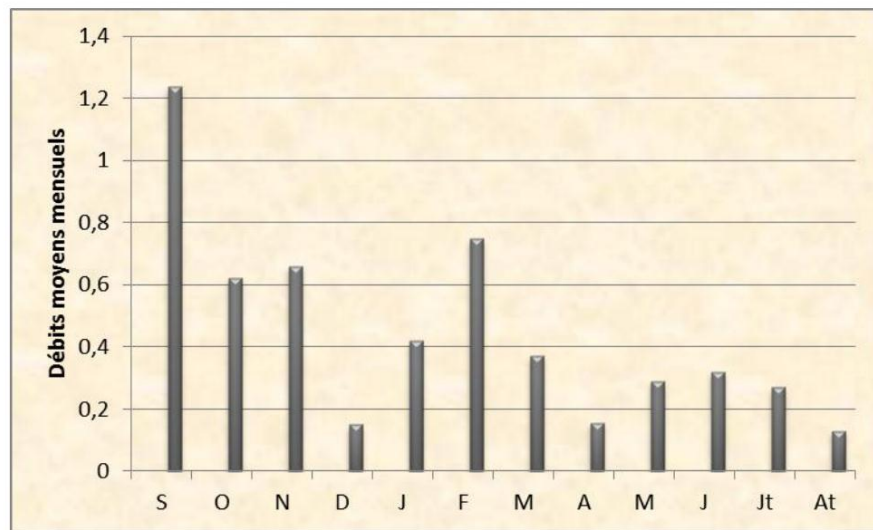


Figure 42 : chronique des débits moyens mensuels

2. Les débits maxima mensuels:

Les débits maxima mensuels sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 39 : Débits maxima mensuels

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
Qmax en m³/s	88,38	75,54	72,88	0,47	80,03	8,91	27,27	0,73	27,9	50,17	15,17	0,48

On note une décroissance rapide du débit de Septembre ($88,38 \text{ m}^3/\text{s}$) à Décembre où il atteint sa valeur minimale de $0,47 \text{ m}^3/\text{s}$. De Janvier le débit décroît de nouveau pour atteindre $0,73 \text{ m}^3/\text{s}$ en Avril. Durant le période sèche le débit oscille autour d'une moyenne de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un maximum au cours du mois de Juin et un minimum en Aout. Ces variations de débit sont liées à des averses qui provoquent d'importantes crues au début de l'automne (figure 43).

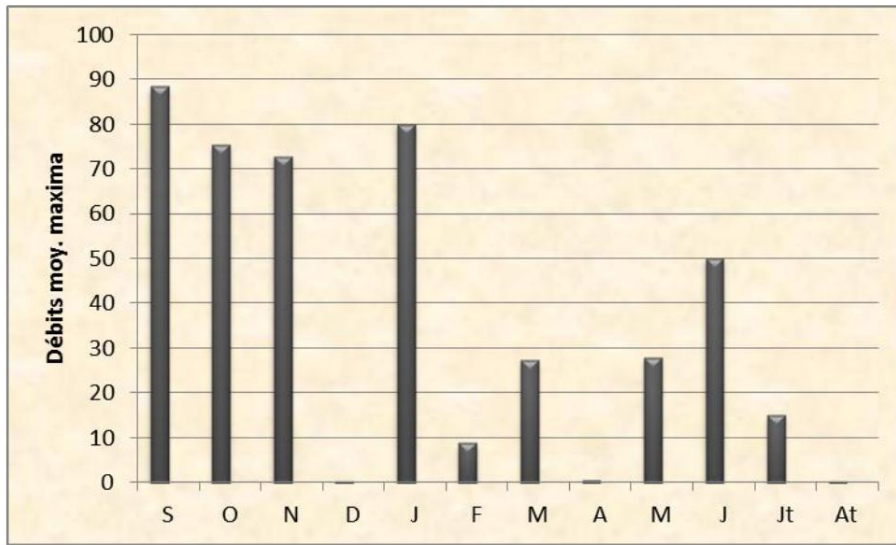


Figure 43 : chronique des débits maxima mensuels

3. Les débits minima mensuels :

Les débits minima mensuels sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 40 : Débits maxima mensuels

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
Qmin en m ³ /s	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,14	0,12	0,10	0,11	0,11	0,10

Les valeurs du débit croissent d'Octobre à Février (0,12 à 0,15 m³/s), au-delà, elles décroissent pour atteindre le minimum en Juillet et en Aout avec une valeur de 0,11 m³/s (figure 44).

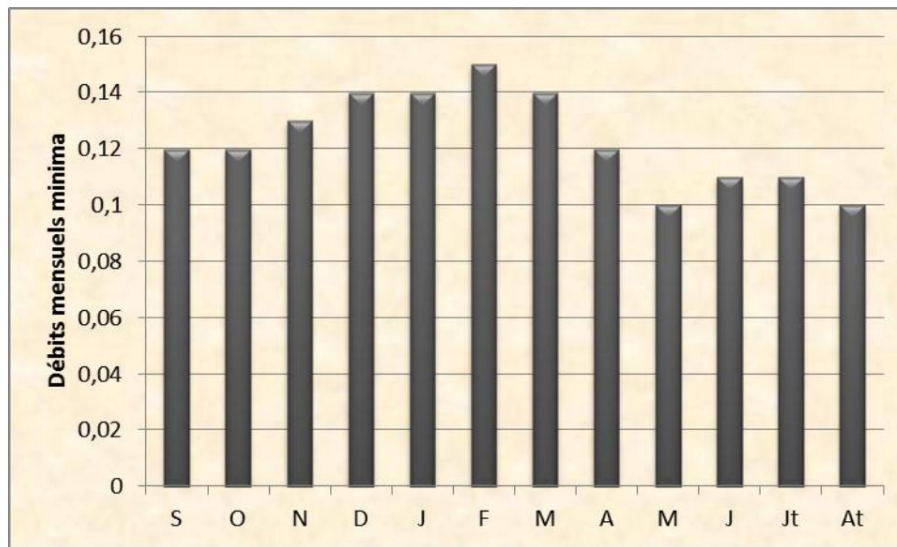


Figure 44 : chronique des débits minima mensuels

4. Courbe des débits classés :

Elle fait apparaître une décroissance très rapide de 1,24 à 0,63 m³/s pour 33% des observations. Au-delà la courbe présente une inflexion pour atteindre un débit de 0,43 m³/s pour 42% des observations, à partir de cette valeur la courbe présente une décroissance lente.

Tableau 41 : Fréquences des débits moyens journaliers

Classe des débits en m ³ /s	Fréquence cumulée %
< 0,13	8,34
[0,13 - 0,16]	16,67
[0,16 - 0,27]	25
[0,27 - 0,3]	33,34
[0,3 - 0,32]	41,67
[0,32 - 0,38]	50
[0,38 - 0,42]	58,34
[0,42 - 0,62]	66,67
[0,62 - 0,66]	75,01
[0,66 - 0,76]	83,34
[0,76 - 1,24]	91,67
>1,24	99,99

Les points sont pratiquement alignés suivant une droite, ce qui témoigne d'un régime d'écoulement est régulier.

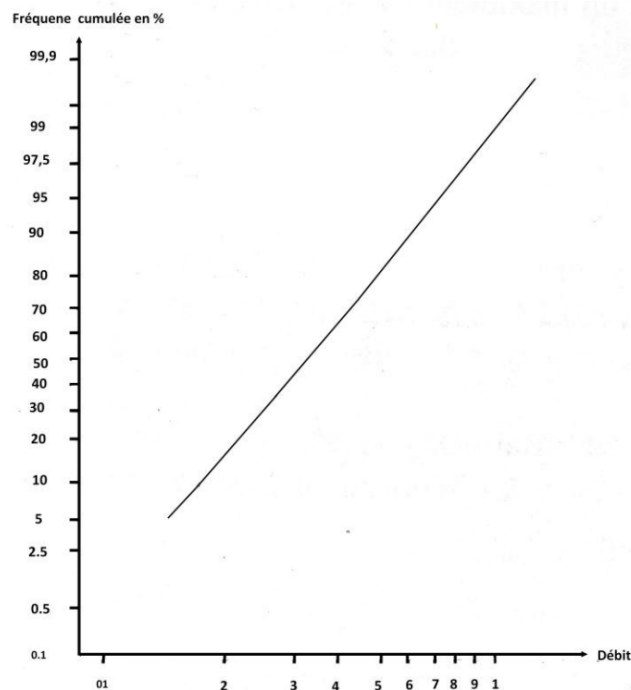


Figure 45 : Courbe des fréquences cumulées des débits classés

5. Courbe de tarage :

Elle permet de reconstituer les débits à partir des relevés d'échelle limnimétrique.

La courbe obtenue suit une fonction polynomiale d'équation :

$$Q = 62,4 H^2 - 4,11 H - 0,0018$$

Avec un coefficient de corrélation $r=0,99$ ($n=42$ observations de 1975 à 1983).

Presque la quasi-totalité des sources alimentant l'Oued Seklafa émergent à travers des fissures et partant de ce principe nous avons préféré la méthode de Maillet lorsqu'une partie de la circulation des eaux se fait dans des systèmes de fissures.

Deux périodes ont été retenues : l'une le trois octobre 1976, l'autre le 6 et le 7 septembre 1980.

❖ Crue du 3 octobre 1976 :

Oct.1976	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Débit en m ³ /s	0,16	0,16	75,21	1,48	1	1,24	0,16	0,16	0,16	0,11	0,13	0,13	0,13	0,11

❖ Crue du 7 septembre 1980 :

Sept.1980	5	6	7	8	9	10	11	12
Débit en m ³ /s	3,4	56,65	88,74	0,9	0,27	0,18	0,16	0,16

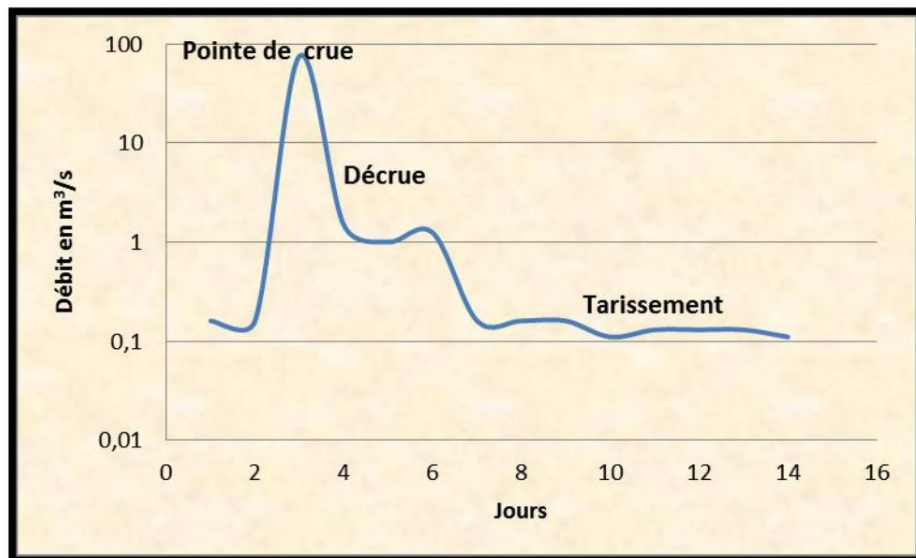


Figure 46 : Crue du 3 octobre 1976

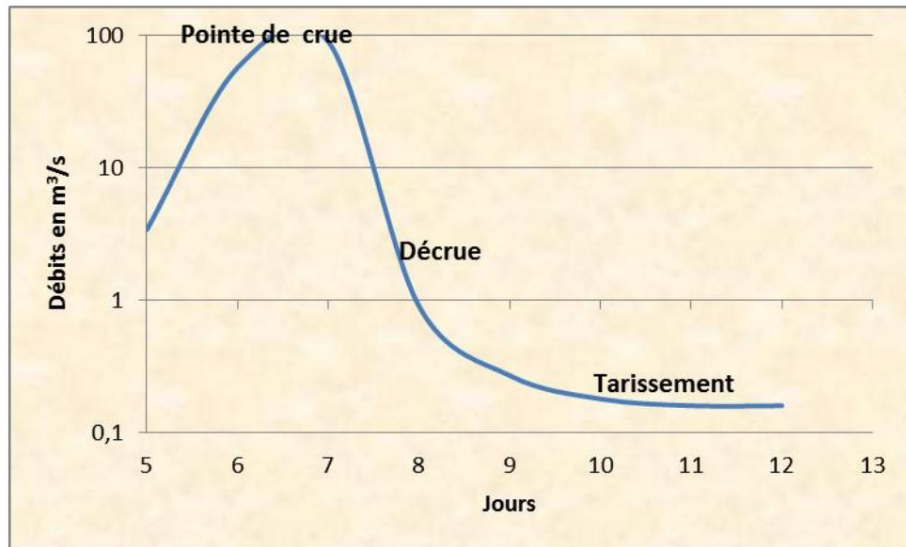


Figure 47 : Crue du 7 septembre 1980

En utilisant les deux formules $Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$ et $W = Q_0 \times 86400 / \alpha$

Les valeurs estimées de volume emmagasiné dans les réserves souterraines sont portées dans le tableau suivant :

Tableau 42 : Calcul de volume emmagasiné

Crue	Q_0	Q_t	t	α	W en 10^6 m^3
1ère crue	0,32	0,1	10,2	0,1140	0,242
2ème crue	0,4	0,16	10,2	0,0898	0,384

Avec :

Q_t : le débit au temps t

Q_0 : le débit initial ordonné à l'origine de la courbe de tarissement

α : coefficient de tarissement lié aux différentes caractéristique de l'aquifère

Les volumes calculés présentent le même ordre de grandeur, ne reflétant pas la réalité, car la station hydrométrique ne prend pas en considération tout le débit écoulé, des pertes latérales existent en plus de l'évaporation intense et l'inféro-flux.

6. Analyse corrélatoire:

L'analyse porte sur les débits moyens journaliers enregistrés à la station de Seklafa où la période étudiée s'étend du 01/09/1975 au 30/08/1981.

Le corrélogramme décroît rapidement pour atteindre la valeur zéro au bout du premier jour, traduisant des événements indépendants les uns des autres. Quelques pics apparaissent pour 11, 78 et 94 jours. Il aurait donc un système peu inertielle avec un effet mémoire nul (figure 48).

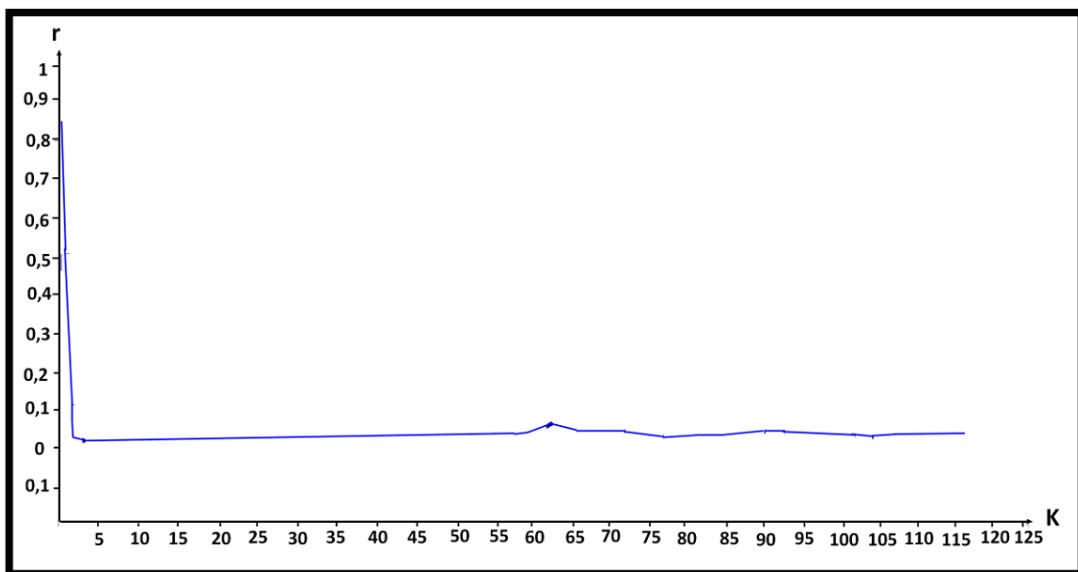


Figure 48 : Corrélogramme de l'Oued de Seklafa

Conclusion

Le climat de la région d'étude a été déterminé par les différentes méthodes, il s'agit d'un climat de semi-aride.

La caractéristique dominante du climat est la tendance à l'aridité qui se concrétise par l'irrégularité du régime pluviométrique et par les fortes températures estivales qui entraînent une intense évaporation.

La région étudiée est caractérisée par un déficit d'écoulement très marqué entraînant ainsi par des pertes en eau considérables soustraites aux apports par les précipitations.

L'infiltration est très faible avec une valeur avoisinant les 2,8 mm soit 1,02% des précipitations de la station d'Aflou.

Dans les régions à climat aride à semi-aride, Le calcul au pas de temps mensuel n'est pas réaliste et l'infiltration ne peut être approchée que par le pas journalier ce qu'on ne pouvait pas faire à cause de manque de données.

Troisième chapitre :
Hydrogéologie du synclinal
d'Aflou

Introduction :

La détermination des caractéristiques hydrogéologiques est très importante pour la connaissance des caractéristiques des aquifères. Cependant elle reste tributaire des informations recueillies à partir du dépouillement des travaux réalisés.

Pour pallier à l'insuffisance des informations, on a combiné les résultats obtenus à partir des données de forages et ceux issus de l'étude géophysique. Ce qui donne un aperçu sur l'hydrogéologie de la région étudiée.

I. Les formations aquifères :

Dans la région d'Aflou, le comportement hydrogéologique des différentes formations est précisé à partir des compagnes piézométriques et logs lithologiques des forages. Ces derniers nous permettent d'individualiser les aquifères suivants :

✚ Aquifère du Kimméridgien inférieur :

Le Kimméridgien inférieur gréseux d'une épaisseur comprise entre 600 et 800 m affleure essentiellement au niveau du cœur de l'anticlinal du Djebel Zlakh et celui du Djebel Chebka, de part sa lithologie et sa position structurale, il représente un horizon perméable à porosité d'interstices, de fractures et de chenaux servant de zone de transfert des eaux infiltrées vers les autres aquifères où se vidangent en contrebas par l'intermédiaire de sources.

Le Kimméridgien marno-calcaire d'une épaisseur de 400 m affleure dans le cœur de l'anticlinal du Djebel Zlakh et celui du Djebel Chebka.


Il est constitué généralement par une alternance de calcaire et de marnes gypseuses de faible perméabilité constituant seulement une zone de transfert vers les zones les plus en aval.

✚ Aquifère du Kimméridgien supérieur:

Le kimméridgien supérieur d'une épaisseur moyenne de 480 m est constitué d'une série calcaréo- gréseuse perméable à porosité d'interstices, de fractures et de chenaux affleurant au niveau de l'anticlinal du Djebel Zlakh avec de forts pendages et celui d'Oum Slimane où elle est représentée par un ensemble d'émergences localisées au cœur de celui-ci.

✚ Aquifère Kimméridgien à Portlandien :

Le Kimméridgien à Portlandien gypseux d'une épaisseur d'environ 160 m est constitué par une alternance de gypse et d'argiles gypseuses montrant quelques passées gréseuses semi-perméables à imperméables affleurant généralement au cœur des anticlinaux avec des forts pendages. Même quand dans certains cas les passées gréseuses sont saturées elles donnent des eaux fortement minéralisées du fait de la présence de gypse.


 **Aquifère du Valanginien-Barrémien :**

C'est un aquifère multicouche constitué de plusieurs niveaux gréseux séparés par des niveaux argileux, l'épaisseur de cette formation dépasse 1000 mètres et peut atteindre 1700 mètres (selon certains auteurs) présentant une perméabilité mixte.


De nombreuses sources émergent au niveau de cette formation dont le débit ne dépasse pas les 10 l/s.

Le Valanginien-Barrémien d'une épaisseur très variable (80-1000 m) a été recoupé sur une profondeur de 850 m au niveau de forage situé au Nord-Est d'Aflou et localisé aux coordonnées (X= 453 ; Y=395,5). Il est constitué de formations fluvio- deltaïques représentées par une alternance de grès à dragées de quartz à stratification entrecroisée, d'argiles gréseuses et d'argiles.

L'ensemble représente un horizon aquifère à porosité d'interstices, de fractures et de chenaux. De part sa situation structurale le Valanginien-Barrémien constitue l'aquifère principal de la région d'Aflou où il représente l'essentiel des affleurements occupant les synclinaux.


 **Aquifère du L'Aptien :**

L'Aptien affleure au niveau du Djebel Gourou et du Djebel Sidi Okba où il atteint une épaisseur de l'ordre de 210 m. Il est constitué par une alternance gréso-argileuse présentant parfois des intercalations de calcaires jaunâtres et dolomitiques. Cette formation constitue un horizon semi-perméable à porosité de fractures fournissant généralement de très faibles débits.

 **L'aquifère du L'Albien :**

L'Albien inférieur constitue un complexe gréso-argileux d'une épaisseur de 120 à 180 m affleurant au niveau du Djebel Gourou et du Djebel Sidi Okba. Il constitue généralement un niveau perméable à porosité d'interstices, de fissures et de chenaux.

L'Albien supérieur est constitué par une alternance de calcaires crayeux, d'argiles verdâtres et de grès carbonatés, il affleure essentiellement au niveau du flanc Nord-Ouest du synclinal du Djebel Sidi Okba et au Douar Ammoura au nord-Est d'Aflou où il atteint une épaisseur de 125 m et constitue un aquifère semi-perméable à porosité d'interstices, de fractures et de chenaux.

 **L'aquifère du Turonien :**

Le Turonien occupe généralement le cœur des synclinaux perchés affleure dans le secteur étudié au niveau du Djebel Gourou et de celui de Sidi Okba où il est représenté par deux barres

de calcaires massifs fracturés dans lesquelles s'intercalent des passées marneuses.

Cette formation constitue un horizon perméable à porosité de fractures.

L'aquifère du Quaternaire :

Le Quaternaire occupe généralement le cœur des synclinaux est constitué par une faible épaisseur comprise entre 0 et 10 m d'alluvions sableuses et argilo-limoneuses semi-perméables à perméables.

Les caractéristiques des différentes formations sont résumées dans le tableau 43.

Tableau 43 : log hydrogéologique synthétique (in Benzeghouda et Bouterbiat 2011)

Etage	Epaisseur	Lithologie	Permeabilité	Hydrogéologie
Quaternaire	0-10	Aluvion,sable	Peu perméable	interstices
Turonien	80	Calcaire	De fissure	Fissure kaarstique
Cénomanién	150	Marnes gypseuses	Imperméable	Substratum
Albien supérieur	100	Calcaire gréseux	De fissure	Interstice et fissure
Albien inférieur	100	Grés	Perméable	Aquifère multicouches Circulation d'interstices et de formes et de chenaux
Aptien	50-60			
Valanginien-Barrémien	1100-1200			
Portlandien	120	Calcaire	Fissure	Circulation de fissure
Kimméridgien	170	Marnes gypseuses	Imperméable	substratum
Kimméridgien	150	Grés	Imperméable	Circulation d'interstices
Kimméridgien supérieur	350	Marno-calcaire Marne gypseuse	Imperméable	substratum
Kimméridgien supérieur	500	Grés	Perméable	Aquifère profond Circulation d'interstices et de fissures

II. Étude de la nappe du Barrémien-Aptien-Albien :

La nappe est implantée dans cette structure synclinale d'Aflou (figure 49) allongée sur plus 80 km suivant une direction SSW-NNE pour une largeur de 10 km. Cette structure est limitée :

- ❖ Au Nord et au Sud par les formations néocomiennes
- ❖ À l'Ouest par les formations triasiques
- ❖ À l'Est par les formations du Jurassique et du Mio-Plio-Quaternaire

1. Structure hydrogéologique :

La nappe est formée exclusivement de grés fins à moyens, parfois grossiers sous le Quaternaire au centre de la cuvette, avec des intercalations de marnes. La puissance des grés qui forment cet aquifère dépasse les 1200 mètres.

C'est un aquifère multicouche avec un système supérieur libre et un système inférieur captif. Il présente une perméabilité mixte.

Les fractures sont responsables de la mise en place d'un certain nombre d'émergences qui naissent dans les formations gréseuses du Barrémien, Aptien, Albien au niveau du synclinal d'Aflou et particulièrement au niveau de Brida et de Sebgag.

On peut citer :

✚ Les sources d'oued Morra :

Ce sont des sources de débordement, l'eau des grés du Barrémien piégée entre les marnes émerge dans le sens inverse du pendage imposé à ces formations (figure 50).

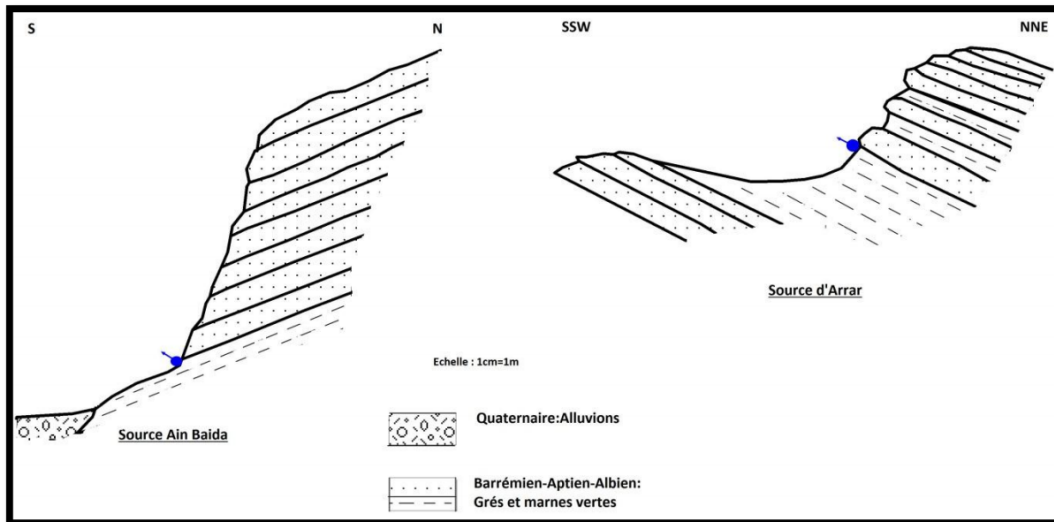


Figure 50: les sources de l'Oued Morra (D'après Stamboul M)

✚ Les sources de Sebtag :

L'association des failles et des fissures dans les séries gréseuses N140°E ont facilité la mise en place du réseau drainant aérien tel que la source d'Ain Assoul (figure 51).

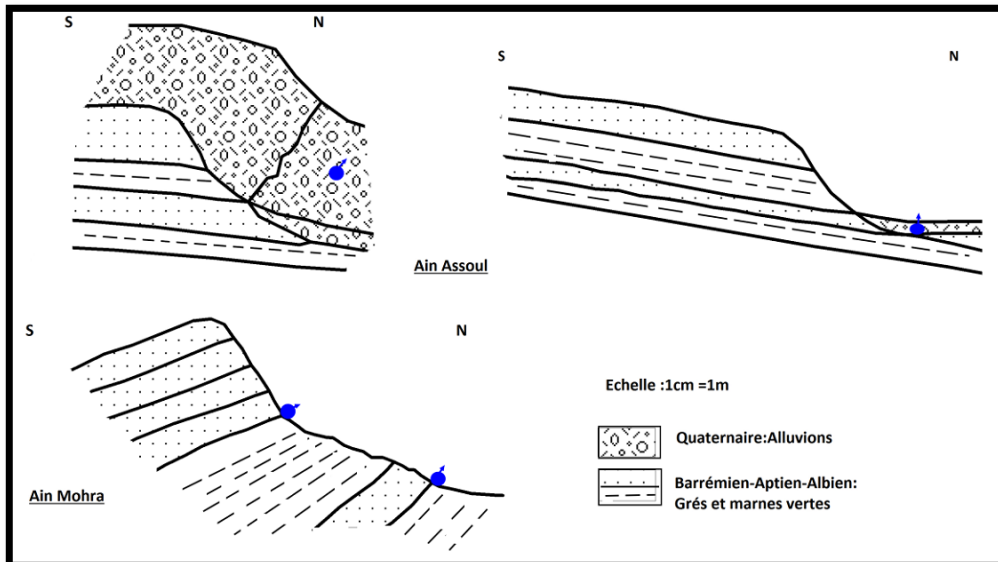


Figure 51 : Les sources de Sebtag (D'après Stamboul M)

✚ Les sources d'Aflou :

Ce sont des sources de déversement dont la plus importante est celle d'Ain Mansour (source très polluée) qui présente un débit de 6 l/s, elle émerge au contact des grés et des marnes de l'Albien à travers les fissures de direction N 60° E.

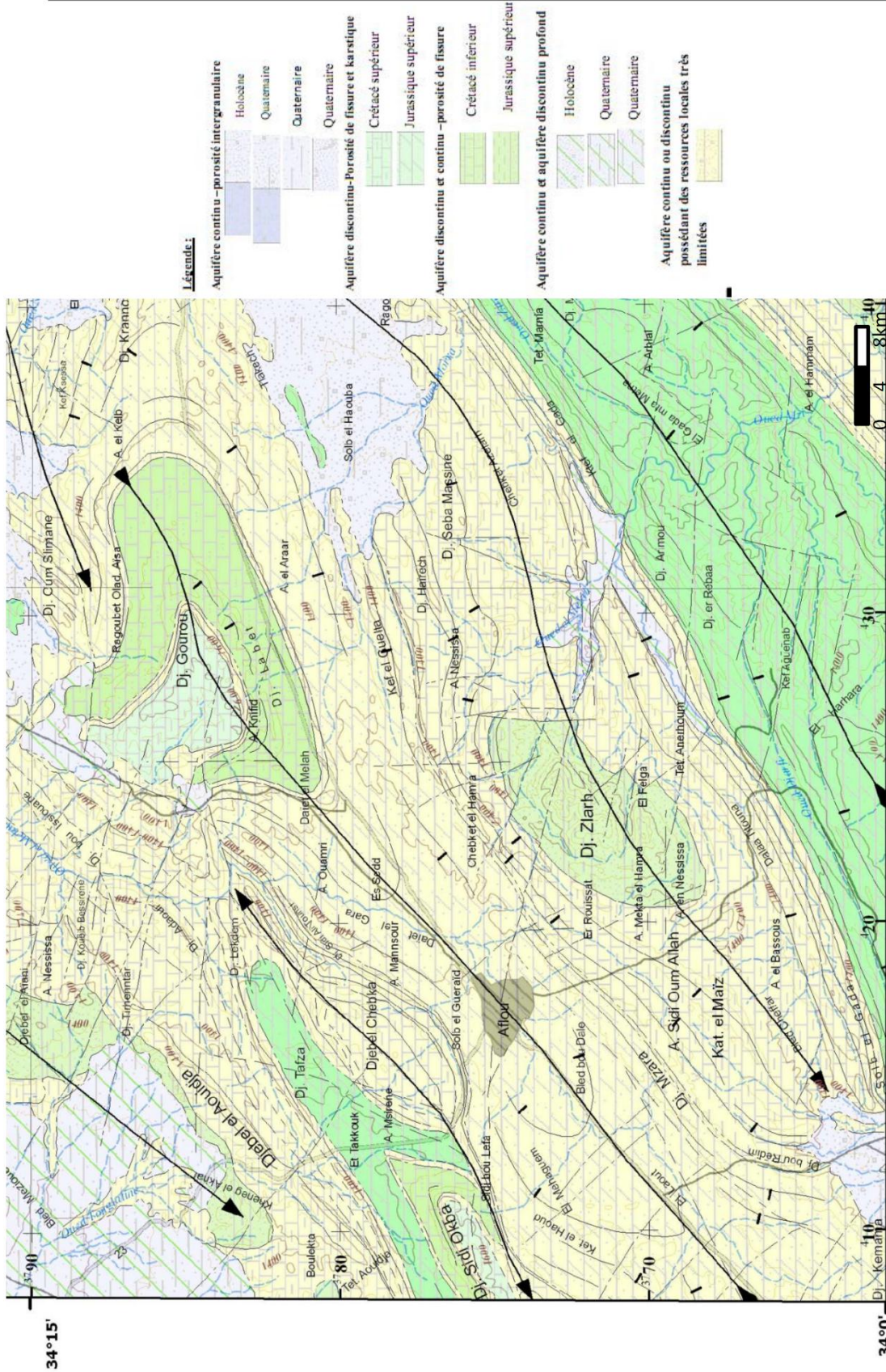


Figure 49 : Carte hydrogéologique de site d'étude

(Extrait de la carte hydrogéologique au 1/200 000 d'Aflou, feuille NI-31-XV ; Edition ANRH 2008)

2. Inventaire des points d'eau :

Un réseau d'échantillonnage a été choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale de la piézométrie la qualité des eaux souterraines de la nappe étudiée. Ce réseau se compose de 121 points d'eau sélectionnés et couvre la totalité de la région (Figure 52).

Ce choix a été justifié d'une part par leur répartition spatiale et d'autre part, par l'importance des formations hydrogéologiques d'aquifère du Barrémien-Aptien-Albien. Les données sont mentionnées dans l'annexe II.

La zone d'étude présente un grand nombre de puits et de forages qui sont dispersés en fonction de la situation de l'agglomération et qui sont destinés presque la quasi-totalité à l'alimentation en eau potable (AEP) de la ville d'Aflou et à l'irrigation.

Suite au développement d'agglomération et d'industrie que connaît le Djebel Amour le nombre des forages a augmenté. Pour la période 1980 à 2007 plus de 300 forages ont été réalisés auxquels il faut ajouter le creusement de nombreux puits traditionnels.

Sur l'ensemble des ouvrages réalisés dans la cuvette d'Aflou six (06) ont été retenus ce qui nous permettra d'avoir une idée directe des aquifères du Barrémien-Aptien-Albien.

Le forage de l'Oued Morra

L'ouvrage destiné à l'agriculture a été implanté à proximité de l'Ain Arrar sur le flanc Sud du synclinal d'Aflou au point de coordonnées $X= 466,100$ et $Y= 397,800$.

Le forage présente une profondeur de 150 mètres, la coupe lithostratigraphique nous montre que nous avons affaire non à un aquifère unique mais à un système multicouche dont l'écoulement se situe dans les grés fins à moyens rouges briques, le niveau statique est de 33 mètres et le débit d'exploitation est de 15 l/s (figure 53).

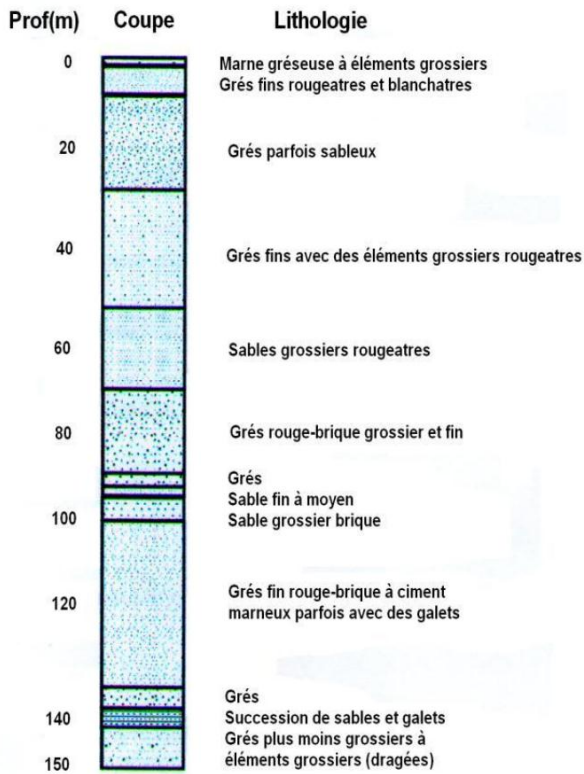
Le forage d'Aflou

C'est un forage de reconnaissance profond de 850 mètres réalisé sur le flanc Sud du synclinal à 400 mètres de l'axe de la cuvette d'Aflou. Ce forage a été implanté pour permettre d'atteindre une meilleure connaissance des différents aquifères du complexe gréseux du Barrémien, Aptien, Albien.

Ce forage ne capte que les aquifères du Barrémien, il est décalé des formations de l'Aptien et de l'Albien affleurant vers le Nord juste au pied du versant Sud du Kef Gourou et la limite entre l'Aptien et le Barrémien longe la route Aflou-Laghout (limite très visible au niveau de l'embranchement vers Oued Morra) (Figure 54)

X= 466,1
Y= 397,8

Profondeur :150 m - Débit :4,5 l/s



X=453,000
Y=395,500
Profondeur :850 m

Débit:23 l/s NS=45 m ND=62 m

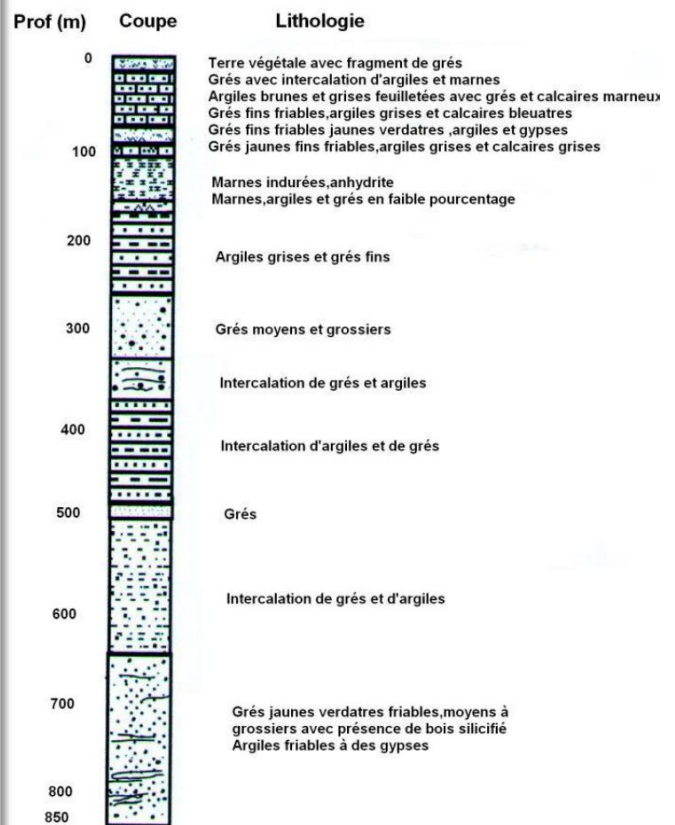


Figure 53: Forage d'Oued Morra

Figure 54 : Forage d'Aflou

(in Stamboul 2005)

✚ Le forage A.F.II

Destiné à alimenter en eau potable de ville d'Aflou, il a été implanté à proximité de l'agglomération aux coordonnées : X= 390,8 ; Y= 445,6 ; Z= 1390.

Ce forage a été implanté dans le Cénomaniens qui a été traversé sur 183 mètres montrant quelques bancs de calcaires en alternance avec les marnes, à cette profondeur ont été atteints les grès de l'Albien qui ont été traversés sur 117 mètres.

L'aquifère se situe dans les formations gréseuses à éléments grossiers et passées argileuses il a été mis en exploitation entre les cotes 220 et 300 mètres (Figure 55).

✚ Le forage A.F.III

Implanté aux coordonnées X= 389,2 Y=444,8 Z=1438

Le forage profond de 300 mètres se situe au cœur du synclinal d'Aflou dans les grès d'Albien .la coupe lithologique établie en cours de forage nous montre un aquifère multicouche dont l'écoulement se situe dans les grès blancs, moyens, poreux avec traces de minéralisation que l'on rencontre entre les côtes 167 et 247 mètres (figure 56).

Ces grès sont surmontés d'argiles sableuses qui rendent la nappe semi-captive tout au moins dans ce secteur.

✚ Le forage d'El -Haoudh

Forage destiné à l'irrigation implanté aux coordonnées X=440,750 Y= 387,80 Z=1450

Profond de 200 mètres à proximité de l'axe du synclinal .il traverse un aquifère multicouche présentant une alternance de grès fins roux et d'argiles.

L'épaisseur des argiles est faible par rapport celle des grès. Le niveau statique est de 12,20 mètres et le débit d'exploitation 12 l/s (figure 57).

✚ Le forage de Brida

Forage destiné à l'alimentation en eau potable du village de Brida, implanté aux coordonnées :

X= 01°44'30 '' Y= 33°58'15'' Z= 1310

Implanté dans les formations gréseuses de l'Albien. La lithologie des terrains traversés nous montre que ce sont des grés fins vers le haut puis des grés blanchâtres à dragées de quartz, vers le milieu on trouve de petites intercalations d'argiles rouge brique et à la fin on rencontre des marnes verdâtres gypsifères.

L'épaisseur de l'Albien est voisine de 300 à 400 mètres tandis que l'Aptien est d'une cinquantaine de mètres, le Barrémien dépasse les 850 mètres (figure 58).

Ce sont des formations homogènes avec des grés moyens à grossiers et présentant fréquemment des intercalations marneuses.

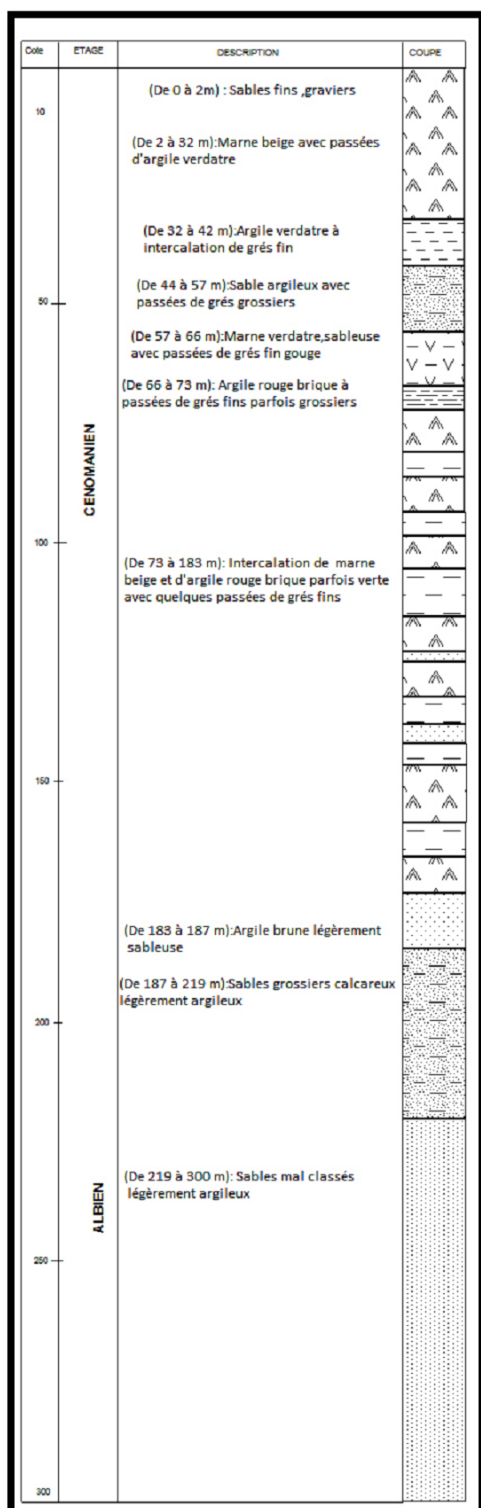


Figure 55: Forage AFII

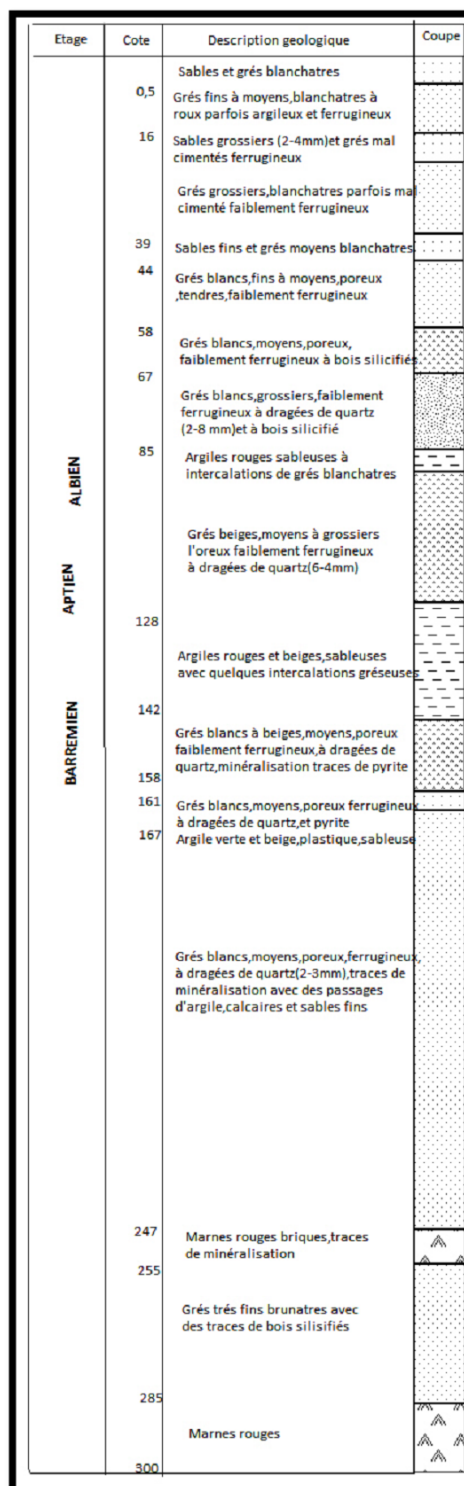


Figure 56 : Forage AFIII

(in Stamboul 2005)

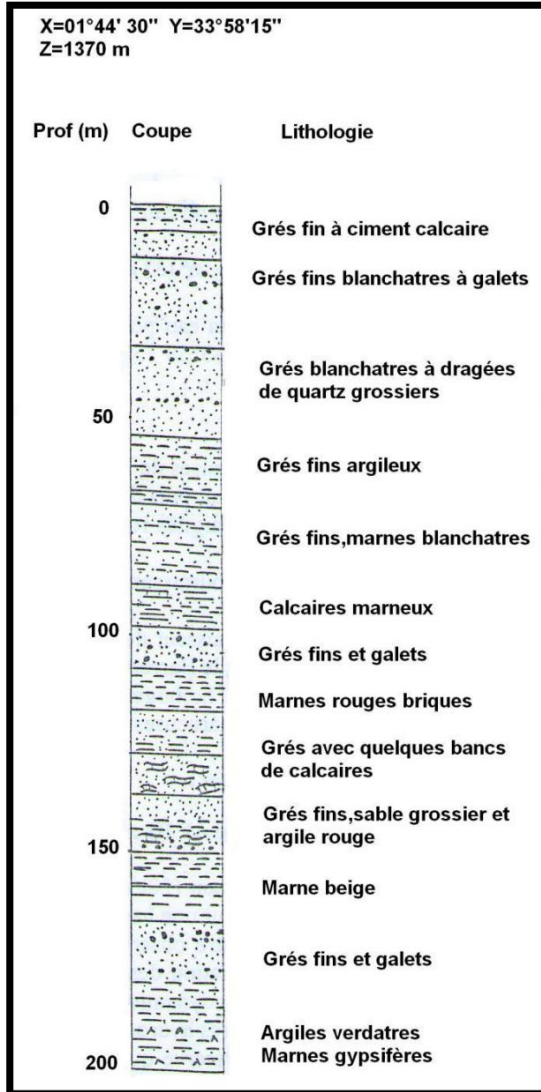


Figure 57 : Forage d'El-Haoudh

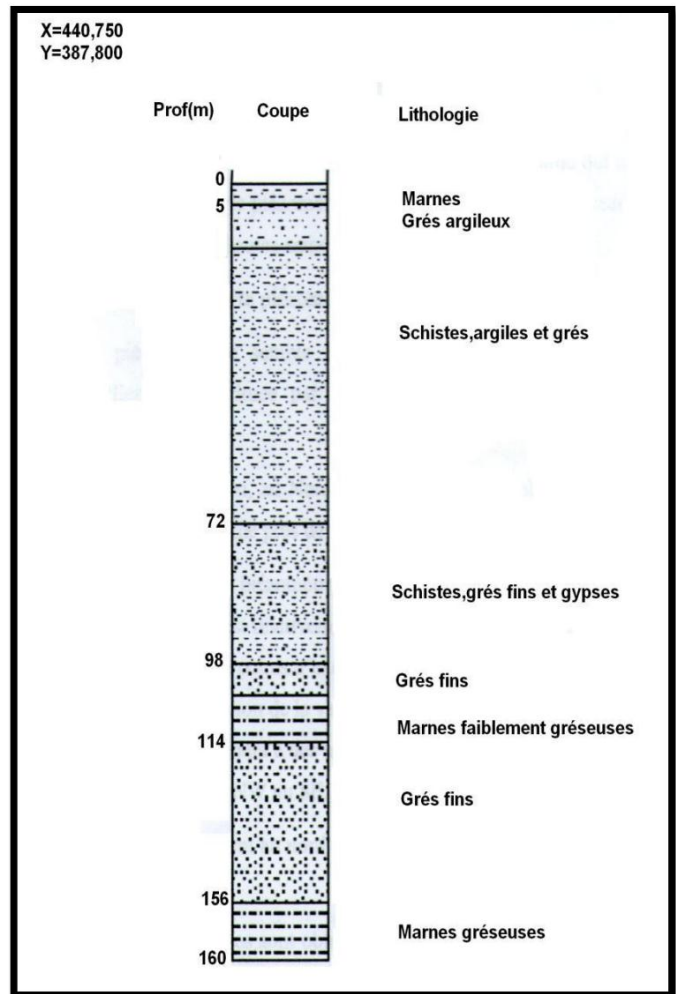


Figure 58 : Forage de Brida

(in Stamboul 2005)

3. Piézométrie:

La carte piézométrique (Figure 59) est la conclusion logique d'une bonne étude hydrogéologique. Elle permet de déterminer les grands axes d'écoulement ainsi que les zones d'alimentation et de drainage.

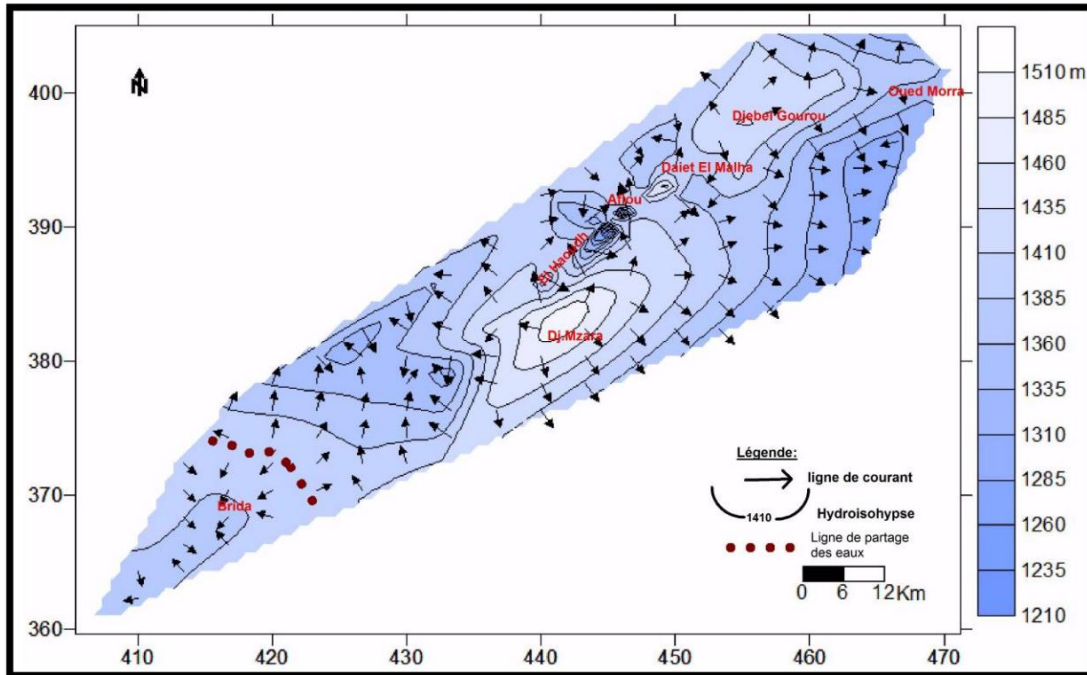


Figure 59 : Carte piézométrique de la région d'étude

4. Interprétation de la carte piézométrique :

La carte piézométrique a été établie par la méthode Natural Neighbor en utilisant le logiciel SULFER.

L'examen des courbes isopièzes montre une surface piézométrique assez irrégulière présentant dans l'ensemble une morphologie complexe. Le tracé des lignes de courant montre un écoulement convergent vers Aflou et El Haoudh avec un apport de direction d'Ouest et de l'Est vers le centre.

L'écoulement n'est pas uniforme; caractère qui se produit par des formes et des espacements variables.

Au niveau d'Aflou et d'El Haoudh on remarque des dépressions piézométriques qui ont une relation directe avec les champs de captage (forages et puits) relativement importants situés près de ces deux sites.

Au Nord d'Aflou on remarque la présence de crête piézométrique où les eaux souterraines ont un écoulement convergeant vers le Nord-Est. Il est à noter que cette forme piézométrique est due à la remontée du Trias.

On remarque un écoulement qui se fait vers l'Oued Morra à partir des formations de Barrémien –Aptien-Albien vers les formations Mio-Plio-Quaternaires.

5 Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère :

Pour connaître les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de Barrémien-Aptien-Albien, nous nous sommes intéressés aux deux pompages d'essai antérieurs forage **AFIII** et forage **AF II**, ils sont effectués en paliers de débits enchaînés.

5.1 Pompage d'essai forage AFIII :

Un pompage à débit constant 20 l/s a été exécuté pendant 12 heures sur le forage AF III à l'aide d'une pompe immergée pour une hauteur manométrique de 150 mètres.

Quelques caractéristiques sont retenues dans le tableau suivant :

Tableau 44: Caractéristiques du pompage d'essai AFIII

Temps	Niveau dynamique (m)	S/m par rapport au niveau statique	Observation sur les mesures
9h45 mn 0	5,12	0	Mise en route
1'	30,42	25,30	Mesure de débit et s toute les minutes
2'	40,80	35,68	"
3'	41,24	36,12	"
4'	41,24	36,12	"
5'	41,24	"	"
o	"	"	"
o	"	"	"
60'	41,24	36,12	"
1h30 mn	41,12	36,12	Mesure de débit et s 30 mn
"	"	"	"
"	"	"	"
"	"	"	"

3h			
"	"	"	Mesure de débit et s
"	"	"	1 heure
"	"	"	"
"	"	"	"
8h	"	"	"
10h	"	"	Mesure de débit et s
"	"	"	2 heures
"	"	"	"
"	"	"	"
12h	"	"	"

(in Stamboul 2005)

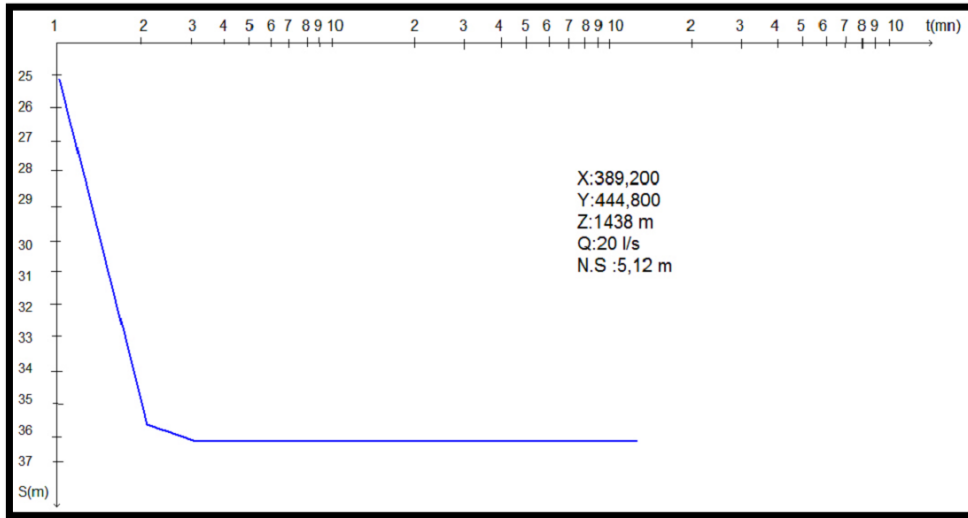
Courbe de descente :

L'application numérique de l'équation de Logan $T = 1,22 Q / S \text{indw}$ a donné une **transmissivité de l'ordre de $0,675 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , à partir de cette valeur la perméabilité est estimée à $0,84 * 10^{-5} \text{ m/s}$ (Tableau45).

Tableau 45 : Résultats de la courbe de descente

Paramètres	S indw en m (rabattement maximal)	Q en m^3/s (débit)	T en m^2/s (Transmissivité)	e en m (Épaisseur de l'aquifère)	K en m/s (Perméabilité)
Forage AFIII	36,12	0,02	$0,675 * 10^{-3}$	80	$0,84 * 10^{-5}$

(in Stamboul 2005)

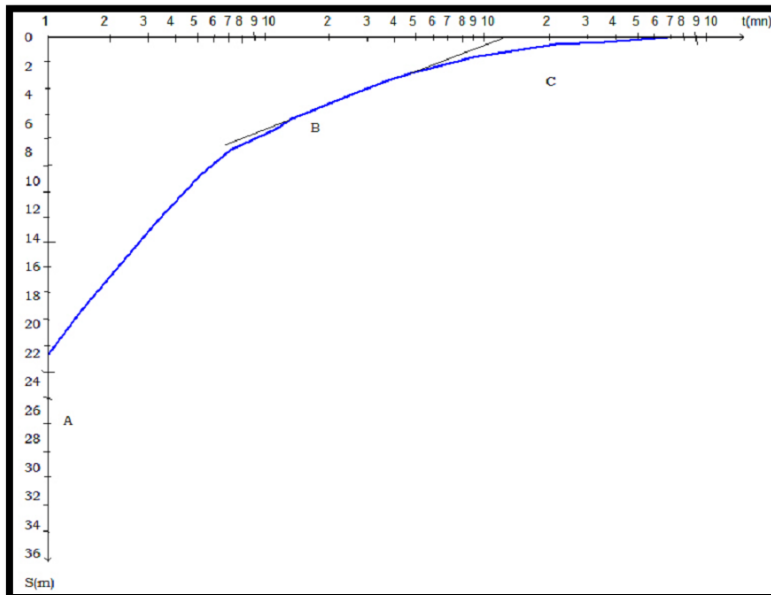


**Figure 60 : la courbe de descente du forage AF III
(in Stamboul 2005)**

Courbe de remontée :

L'analyse de la courbe de remontée montre qu'elle comporte trois parties :

- Une remontée rapide de 41,24 à 24,60 mètres (A)
- Une remontée plus lente de 24,60 à 10 mètres (B)
- Une remontée très lente de 7,30 à 2,80 mètres (C)



**Figure 61 : courbe de remonté du forage AF III
(in Stamboul 2005)**

Les résultats obtenus du calcul de la transmissivité sont proches les uns des autres qu'on peut les résumer dans le tableau suivant :

Tableau 46 : Valeurs de transmissivité par les trois méthodes

Méthode d'approximation	Valeur de T en m ² /s
Logan	0,675 *10 ⁻³
Theis et Jacob	0,546*10 ⁻³
Jacob	0,550*10 ⁻³

5.2 Pompage d'essai forage AF II :

Un essai de débit par paliers enchainés a été exécuté sur le forage à l'aide d'une pompe à axe vertical. Il a été réalisé en trois paliers.

Les caractéristiques que sont mentionnées dans le tableau ci-dessous

Tableau 47: Caractéristiques du pompage d'essai de forage AFII

Niveau statique : 22,18 m	Premier palier	Deuxième palier	Troisième palier
Durée du pompage en Heure	9	9	1
Débit l/s	10	20	25
Rabatement en mètre	12,32	24,10	30,98
Niveau dynamique en mètre	34,50	46,28	53,16

Cet essai de courte durée permet d'évaluer les caractéristiques du complexe ; aquifère-ouvrage de captage ; qui sont le débit critique et les pertes de charges qui sont réparties comme suit dans le tableau suivant :

Tableau 48 : Pertes de charge

Paliers	Pertes de charge	
	Linéaire BQ	Quadratique CQ ²
01	11	1
02	22	4
03	27	6,2

On peut constater que les pertes de charge liées au forage sont plus faibles que celles inhérentes à l'aquifère ; le captage a été donc bien réalisé débit critique estimé à 18 l/s à partir de la courbe caractéristique du forage (figure 62).

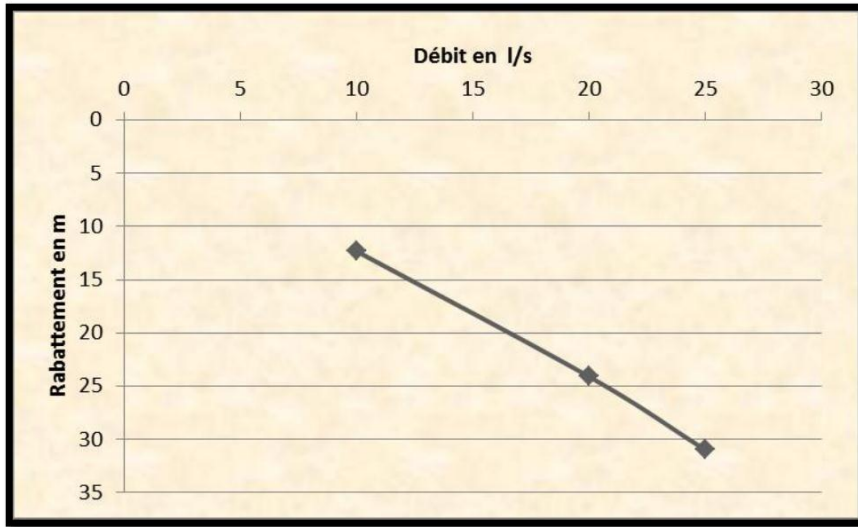


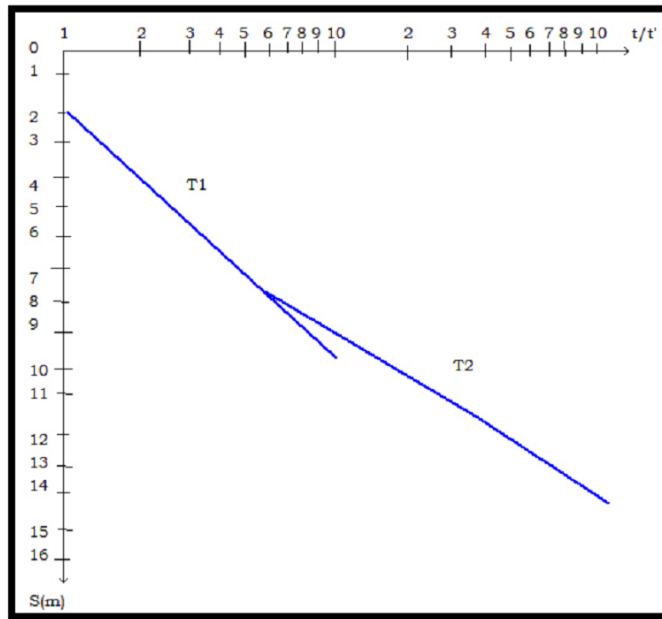
Figure 62 : courbe caractéristique du forage AFII



Figure 63 : Représentation graphique $s=f(Q)$ et $s'=f(Q)$

Les valeurs obtenues portées sur un graphique débit/ rabattement se superposent parfaitement à la courbe observée (figure 63). L'essai de puits est correct.

L'interprétation de la courbe d'essai de la remontée par ma méthode de C .E. Jacob (figure 64) a permis de calculer une transmissivité moyenne de $0,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et la perméabilité déduite est de $0,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.



**Figure 64 : courbe de remontée
(in Stamboul 2005)**

On peut noter des variations des valeurs de la perméabilité et celles de la transmissivité, probablement liées à la nature lithologique de l'aquifère et en particulier la granulométrie variée des formations gréseuses.

III. Apport de la géophysique :

Introduction :

La géophysique est un moyen indispensable dans toute étude hydrogéologique. Elle permet de déterminer les différentes structures, la géométrie des réservoirs, déceler les accidents tectoniques et définir les zones susceptibles d'être aquifères.

L'Entreprise Nationale de Géophysique (E.N.A.G.E.O) avait effectué deux campagnes géophysique par la méthode de sondage électrique dans la région du synclinal d'Aflou suite à la demande de l'A.N.R.H d' Alger.

Les travaux de terrain de La première campagne ont commencé le 15/08/1986 et se sont achevés le 10/12/1986. Sur un total de 224 sondages électriques prévus :

- 94 ont pu être réalisés en ligne AB=4000 mètres
- 112 ont pu être réalisés en ligne AB=3000 mètres
- 18 n'ont pu être réalisés à cause d'obstacles

La deuxième campagne s'est déroulée du 14/04/1988 au 20/06/1988 dont treize (13) profils électriques ont été réalisés qui sont orientés NW-SE comportant :

- 26 ont pu être réalisés en ligne AB=400 mètres
- 63 ont pu être réalisés en ligne AB=3000 mètres dont cinq (05) sondages étalons

Le but de ces deux études consistait à identifier les structures géologiques de la région en vue de localiser celles favorables à l'accumulation d'eau (formation aquifère) et enfin de déterminer les zones favorables à l'implantation des ouvrages de captage.

Les travaux de travail e l'interprétation des sondages électriques ont abouti à l'établissement des différentes coupes géoélectriques et des différentes cartes (équi-résistivité, mur, épaisseur et RT).

1. Coupes géoélectriques :

L'examen des coupes géoélectriques effectuées dans la région ont permis de déterminer cinq terrains. Une échelle de résistivité a été établie relative à ces formations.

Tableau 49 : Échelle de résistivité des formations

Formations	Résistivité en ohm.m
Niveaux argileux et argilo-gréseux du Valanginien- Barrémien	15 à 80
Niveau gréseux du Valanginien -Barrémien	100 à 600
Calcaires et grés de l'Albo-Aptien	95 à 300
Argiles du Cénomanién	20 à 50
Calcaires de Turonien	100 à 135

L'ensemble de coupes constitue une forme synclinale asymétrique présentant un flanc plus redressé au Sud-Est, ce synclinal correspond à une cuvette remplis par des dépôts séquentiels du crétacé inférieur.

Ainsi on constate un rétrécissement du synclinal provoquant d'une part un fort pendage sur le flanc, d'autre part un approfondissement du Valanginien –Barrémien.

2. Cartes en équirésistivités :

Trois cartes ont été établies à partir des valeurs de résistivités apparentes, obtenues à partir des sondages électriques AB =400,1000 et 3000 mètres, ce qui donne une tranche de terrain prospectée allant de 40 à 750 m de profondeur ($AB/10 < h < AB/4$).

L'examen des cartes en équirésistivités nous montrent que les valeurs de résistivité changent considérablement pour des allongements AB différents (AB= 400,1000 et 3000 mètres).

- ❖ La carte en AB= 400 mètres (figure 65) montre (du Nord vers le Sud) successivement des zones résistantes et des zones conductrices de faible étendue.
- ❖ La carte en AB= 1000 mètres (figure 66) montre de la même manière des zones résistantes et des zones conductrices mais à des endroits différents ,par exemple sur le profil 31 ,au niveau du SE I 31(carté en AB= 400 m),nous avons la zone résistante de résistivité 200 ohm/m, contrairement à la carte en AB=1000 m où cette zone a disparu ,par conséquent il existe une succession de couches résistantes et conductrices au fur et à mesure que l'on descend en profondeur cette succession est conforme à la

lithologie du Valanginien – Barrémien qui est constitué de niveaux argileux et de niveaux gréseux.

- ❖ La carte en AB=3000 mètres (figure 67) montre des zones résistantes à très résistantes, néanmoins il existe des zones conductrices d'une résistivité de 50 ohm. Mais d'extension réduite.

La géophysique a montré une succession de couches résistantes et conductrices au fur et à mesure qu'on descend en profondeur, succession conforme à la lithologie du Barrémien-Aptien-Albien caractérisée par une superposition de formations gréseuses et marneuses.

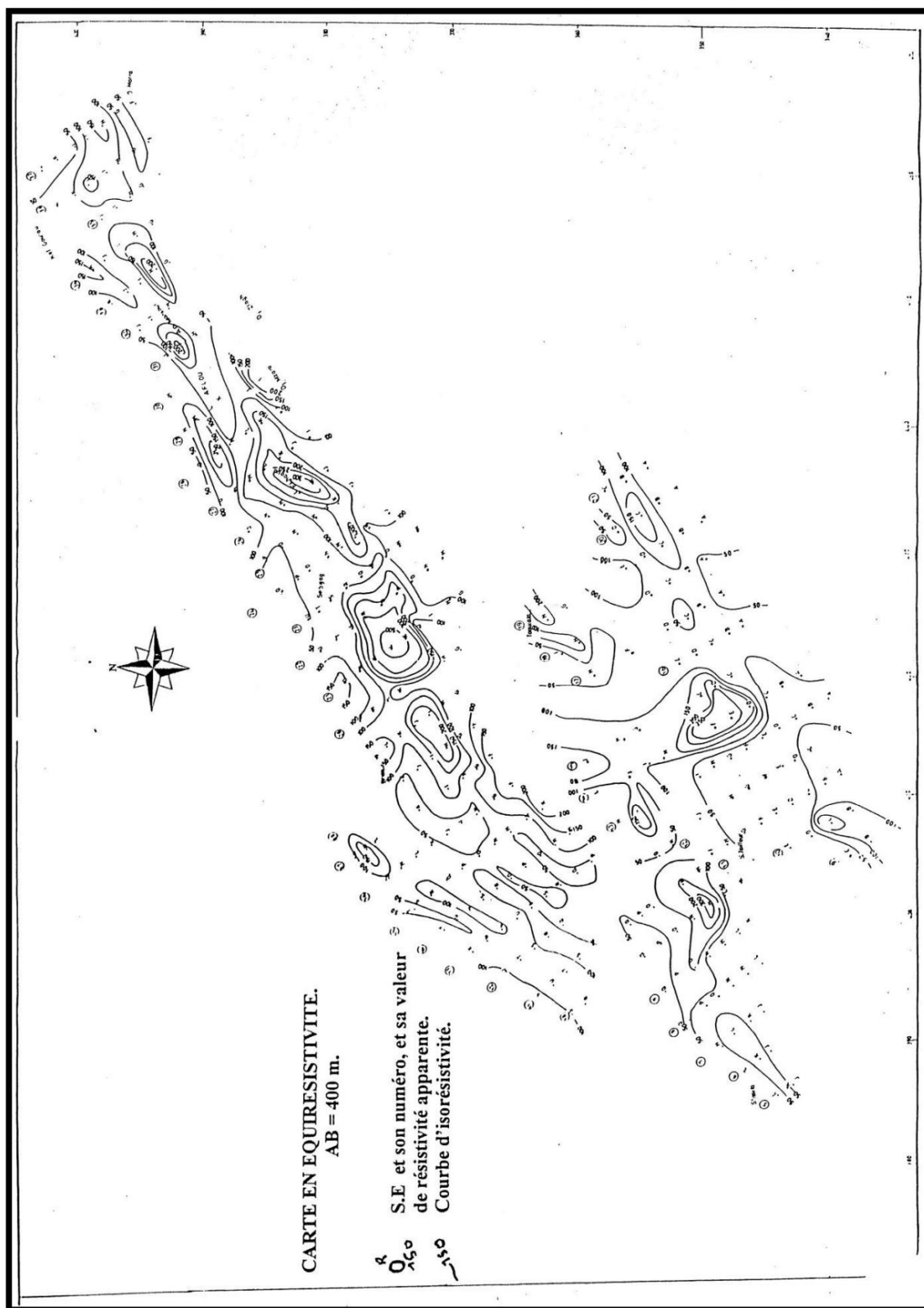


Figure 65: Carte en équirésistivités en AB=400 m
(in Stamboul 2005)

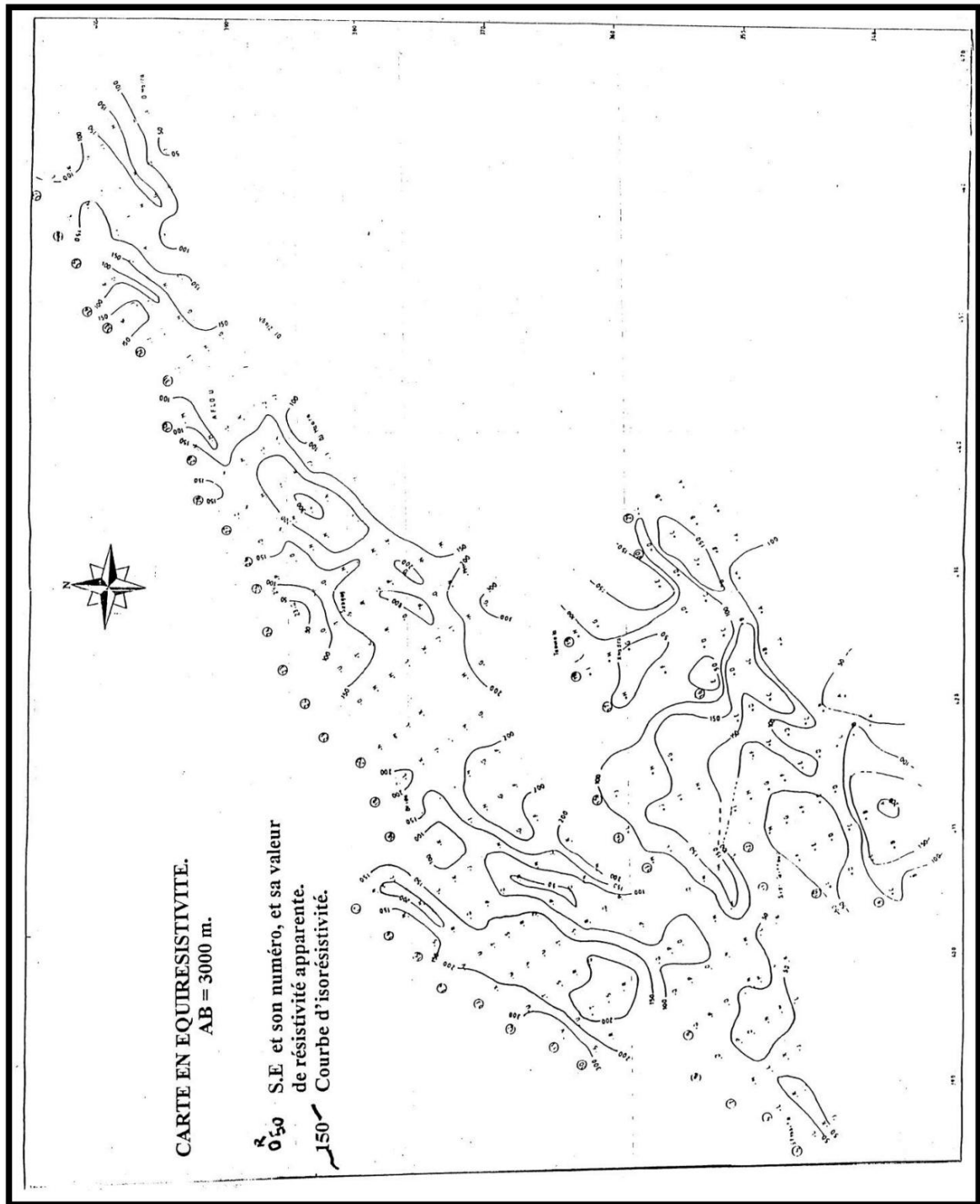


Figure 67 : Carte en équirésistivités en AB=3000 m (in Stamboul 2005)

3. Carte du mur du premier niveau résistant :

En général, l'examen de la carte montre que les courbes isobathes semblent s'organiser en une structure synclinale conformément à la géologie de la région. En effet il existe plusieurs aires synclinales d'orientation Sud Ouest-Nord Est.

Le synclorium s'approfondit au niveau du Djebel Mahalta au Sud Ouest de Sidi Slimane, Brida, Sebgag et au Nord Est d'Aflou.

La dénivelée entre les flancs et l'axes de cette structure est de l'ordre de 300 à 400 mètres.

La structure ainsi mise en évidence, favoriserait certainement l'accumulation d'eau souterraine (Figure 68).

4. Carte en épaisseur :

L'examen de la carte a montré cinq zones où l'épaisseur du premier niveau résistant dépasse 150 mètres, ces zones se répartissent le long de l'axe du synclinal l'épaisseur de ce niveau varie de 15 m au SE M16 à 300 m au SE H32 et I33 (Figure 69).

5. Carte en résistance transversale :

La carte en résistance transversale a été établie à partir des résistivités tirées des courbes pour avoir une idée sur les zones transmissives.

Vu qu'il existe une relation entre la résistance transversale qui est égale au produit de l'épaisseur par la résistivité, et la transmissivité qui est le produit de l'épaisseur par le coefficient de perméabilité ($RT = a \cdot c$ et $T = K \cdot c$).

Cette carte met en évidence des zones à fortes RT (40000 ohm.m²) alignées selon l'axe du synclinal séparées par des zones de résistance transversale moindre.

Nous remarquons que les zones à faible RT sont localisées sur les bordures du synclinal, ceci dû principalement à la faible épaisseur de l'aquifère (Figure 70).

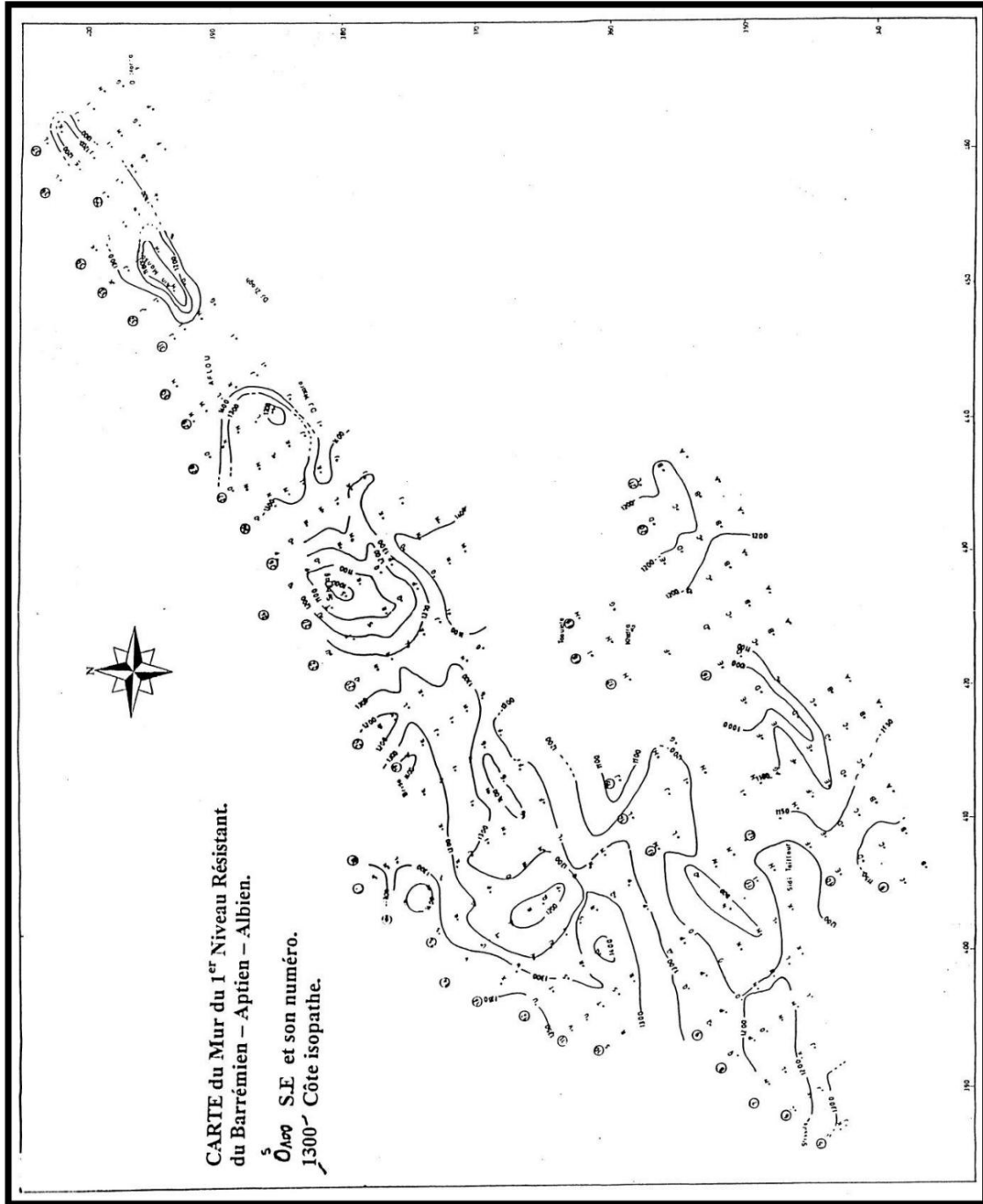


Figure 68: Carte du mur
(in Stamboul 2005)

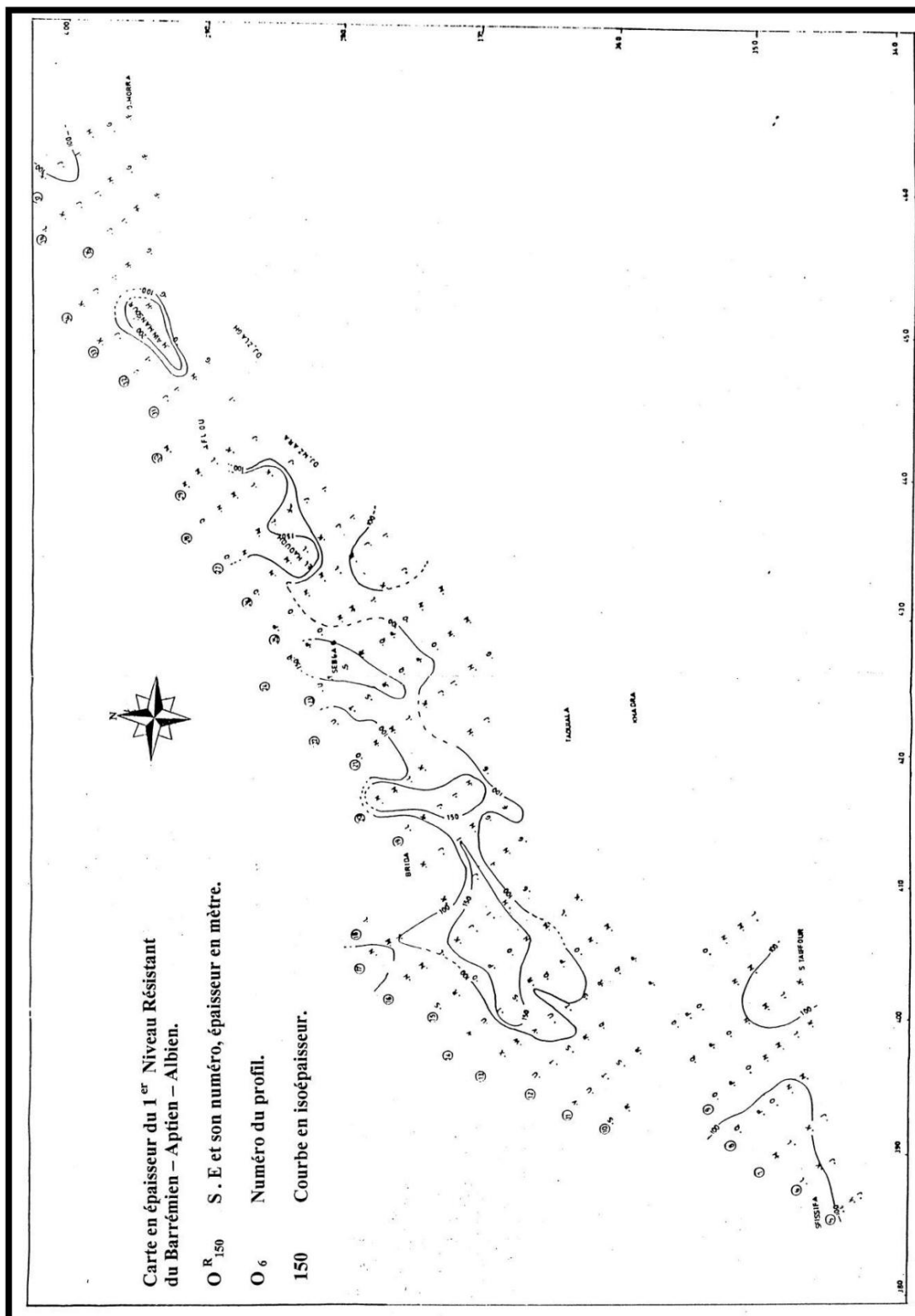


Figure 69 : carte en épaisseur
(in Stamboul 2005)

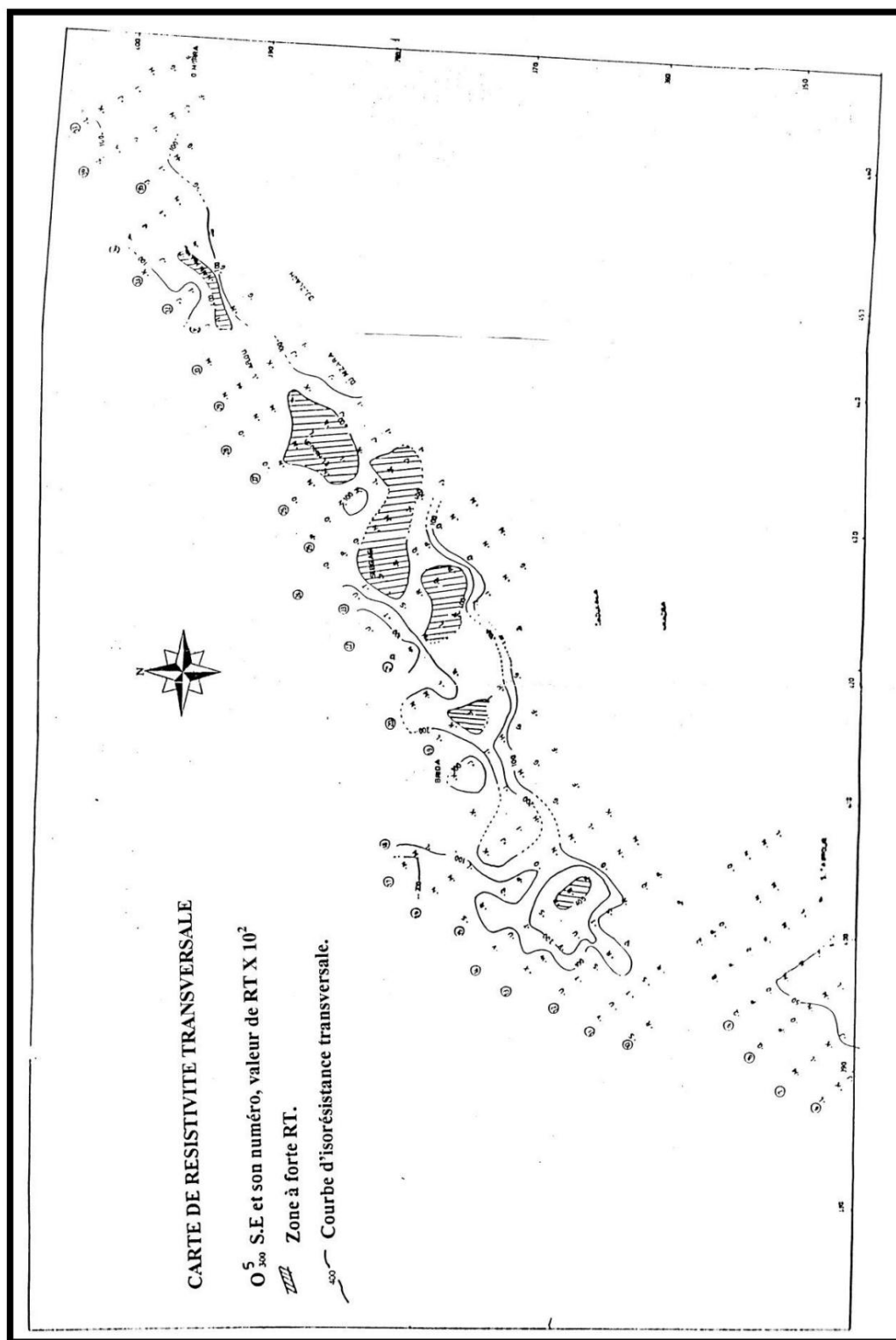


Figure 70 : Carte de résistance transversale
(in Stamboul 2005)

Conclusion

Le complexe gréseux de Barrémien-Aptien-Albien constitue l'aquifère le plus important dans le synclinal d'Aflou du point de vue son épaisseur. Il s'agit d'un aquifère multicouche à perméabilité mixte où la fissuration joue un rôle primordial dans la circulation des eaux souterraines.

Les deux forages AF II et AF III donnent une idée sur le comportement hydrodynamique de cet aquifère présentant les mêmes valeurs ordres de grandeurs en transmissivité ($0,481 \cdot 10^{-3}$ pour AFII et $0,550 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour AFIII).

La carte piézométrique a montré des zones dépressives au niveau d'Aflou et Haoudh ainsi qu'une crête piézométrique au Nord d'Aflou.

L'étude géophysique de la région d'Aflou nous amène aux conclusions suivantes :

- Un aquifère multicouche (Valanginien- Barrémien) constitué par une alternance de couches assez épaisses de grès, argiles et grès argileux. Cet aquifère occupe toute la région de l'étude.
- Un aquifère Albo-Aptien constitué de calcaires et grès d'épaisseur appréciable localisée au Nord-Est d'Aflou.
- Le synclinal d'Aflou se présente sous forme arrondi légèrement déversé vers le Sud-Est.

Quatrième chapitre :
Hydrochimie du synclinal d'Aflou

Introduction :

Dans les régions arides et semi-arides trouver l'eau, n'est pas l'objectif final, mais encore faut-il qu'elle soit utilisable. Il est important alors de connaître les processus géochimiques dans ces régions, afin de caractériser les eaux de ces systèmes aquifères.

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-).

Le présent chapitre traite du chimisme des eaux souterraines, et nous permettra d'essayer tentons d'expliquer le comportement, l'origine et l'évolution des éléments chimiques décrits pour expliquer le fonctionnement du système aquifère et l'influence des minéraux évaporitiques.

I. Description sommaire des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines :

1. Qualité des données :

Avant de traiter et d'interpréter les analyses des eaux, il faut analyser la fiabilité des résultats de ces analyses. La méthode utilisée est la Balance Ionique (BI). Il faut rappeler qu'en théorie, une eau naturelle est électriquement neutre. De ce fait, la somme (en équivalents chimiques) des cations devrait être égale à celle des anions. En réalité, cette égalité est rarement obtenue. De façon générale, la différence est attribuée aux incertitudes, à la présence de certains ions non dosés ou à d'éventuelles erreurs d'analyse. Ainsi, une certaine marge de déséquilibre entre anions et cations est admise. Elle est exprimée sous forme d'un écart relatif par la formule :

$$BI = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} * 100$$

D'une manière générale, des analyses chimiques sont considérées :

- Excellentes lorsque $BI \leq 2\%$
- Acceptable lorsque $2\% < BI \leq 5\%$,
- Mauvaise lorsque $BI \geq 5\%$

En ce qui concerne les données des eaux traitées dans le cadre de cette étude avec 171 points répartis le long de la zone (voir Annexe III), il révèle que :

- 79 % des analyses sont de bonne qualité
- 17 % des analyses sont acceptables
- 3 % des analyses médiocres

Dans les eaux étudiées, les sommes des cations (Σ^+) et des anions (Σ^-) analysés ont été calculées en meq/l (voir Annexe IV). Reportés dans un diagramme somme des anions Σ^- en fonction de la somme des cations Σ^+ (Figure 71), la plupart des échantillons présente un équilibre des charges en se positionnant sur la droite linéaire.

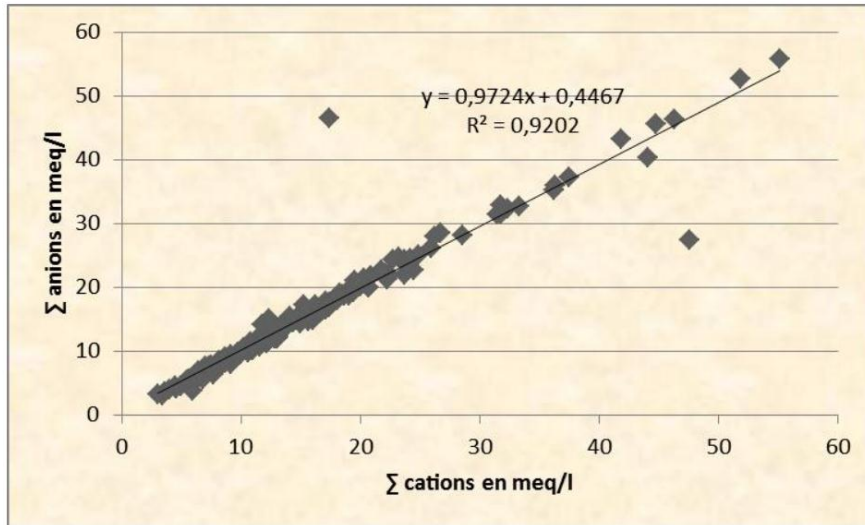


Figure 71 : Diagramme sommes des anions en fonction des cations pour les points d'eau

2. Paramètres physiques :

2.1 Potentiel d'Hydrogène (pH) :

Le pH est par définition, une mesure de l'activité des ions H⁺ contenus dans une eau. C'est une caractéristique qui témoigne à la fois de l'acidité et de la basicité d'une solution, la composition chimique et l'état d'équilibre dans lequel se trouvent les composantes de cette solution; c'est également un élément important qui renseigne sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau.

Tableau 50 : Résultats des analyses du pH des échantillons des eaux

Éléments	Normes O.M.S	Normes Algériennes *	Max.	Min.	Moy.	Écart-type
pH	6.5 à 8.5	6,5 - 8,5	8,2	7	7,72	0,21

*Source des Normes Algériennes : Journal Officiel de 23 Mars 2011 de la République Algérienne. Décret exécutif n°11-125 relatif à la qualité d'eau de consommation humaine

Les mesures du pH du tableau 50 montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité oscillent entre 7 et 8,2 ; ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles.

2.2 La conductivité électrique (CE):

La conductivité mesure l'aptitude de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau et par suite donner une idée sur la minéralisation totale d'une eau.

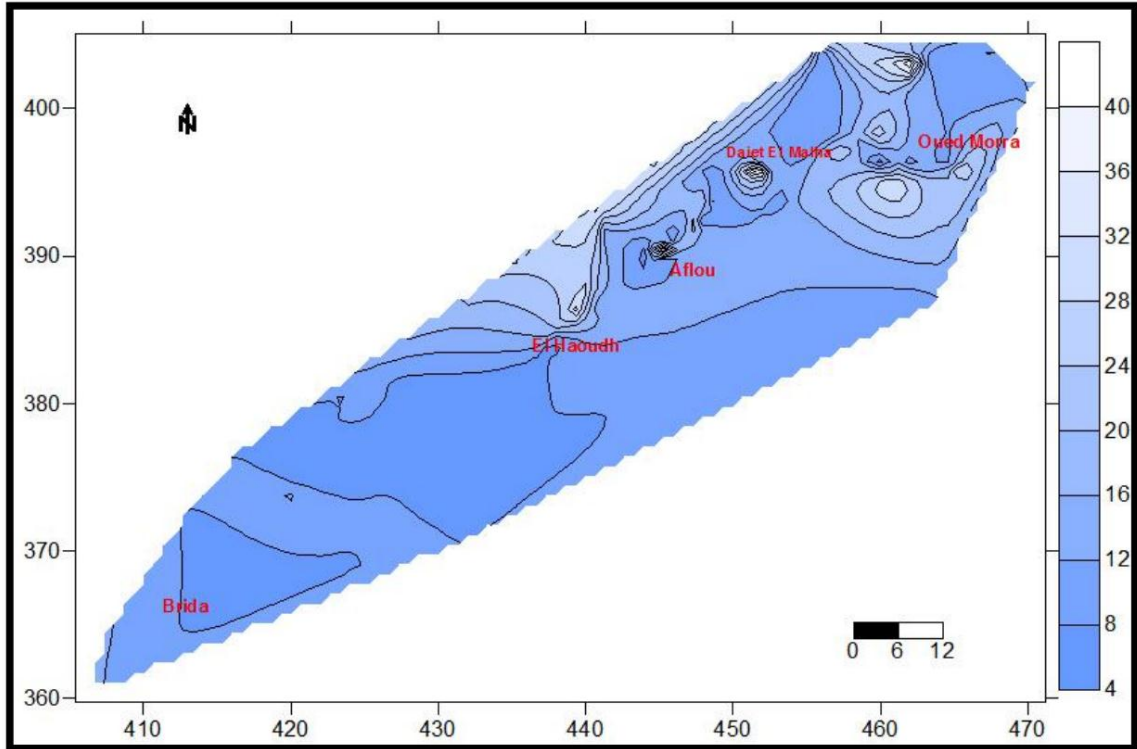


Figure 72 : Carte de la conductivité électrique du synclinal d'Aflou

La figure 72 révèle que Les valeurs de La conductivité électrique sont comprises entre 4 et 59 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ où les fortes valeurs se situent soit :

- Dans les régions à vocation agricole (utilisation d'engrais) et pompages intenses, d'où une dissolution importante des évaporites englobées dans les marnes du Mio-Pliocène et du Barrémien-Aptien-Albien (El Haoudh et Aflou).
- Aux rejets résiduaire et à leur utilisation pour l'irrigation (Ain Mansour et Aflou).
- À l'influence directe de la lithologie et surtout des formations évaporitiques du Trias (Kef Gourou) et celles du Néocomien inférieur.
- À la tectonique, les maxima coïncident avec les failles (El-Haoudh, Aflou) ce qui nous permet d'admettre l'arrivée d'eau minéralisée en provenance des nappes sous-jacentes.
- Au sens d'écoulement qui entraîne un enrichissement en éléments chimiques.

3. Les éléments majeurs :

3.1 Anions :

Les résultats des analyses montrent une concentration élevée des sulfates qui varie de 0 à 2090 mg/l avec une moyenne de 329,81 mg/l (Tableau 51).

Tableau 51 : Résultats des analyses des anions des eaux échantillonnées

Éléments en (mg/l)	Normes O.M.S	Normes Algériennes	Maximale	Minimale	Moyenne	Écart-type
HCO ₃ ⁻	Non mentionnée	Non mentionnée	827	60	241,11	94,04
SO ₄ ²⁻	Max 250	200 à 400	2090	0	329,81	327,30
Cl ⁻	Max 250	200 à 500	795	10	132,27	124,45
NO ₃ ⁻	Max 50	Max 50	485	0	47,54	59,28

Le diagramme de concentrations des anions confirme cette augmentation par rapport aux autres anions, les bicarbonates et les chlorures ont des teneurs assez proches (figure 73).

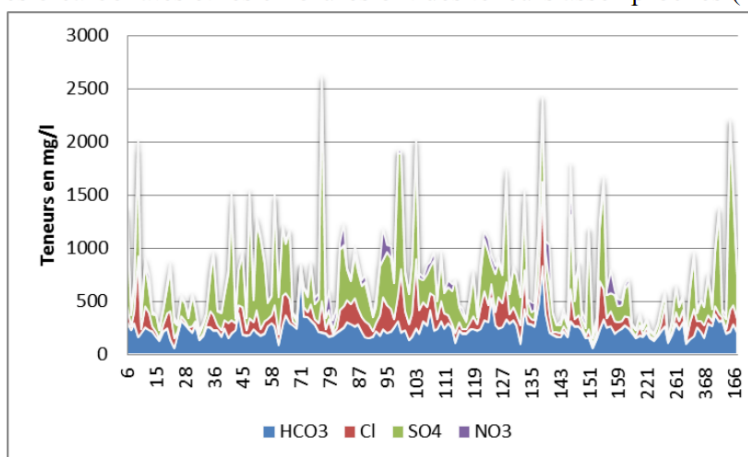


Figure 73 : Concentrations des anions des eaux

3.2 Cations :

Les concentrations des cations sont illustrées par la figure 74 qui montre que le cation le plus abondant par rapport aux autres est le calcium qui présente des concentrations qui varient entre 40 et 680 mg/l avec une moyenne de 145,09 mg/l (Tableau 52).

Tableau 52 : Résultats des analyses des cations des eaux échantillonnées

Éléments en (mg/l)	Normes O.M.S	Normes Algériennes	Maximale	Minimale	Moyenne	Écart-type
Ca ²⁺	200	75 à 200	680	40	145,09	91,42
Mg ²⁺	150	150	256	6	60,97	46,25
Na ⁺	200	200	340	5	66,51	61,18
K ⁺	12	20	29	0	5,51	4,33

Le Magnésium présente par des concentrations moyennes par rapport à la concentration totale des cations, suivi par le sodium et le potassium.

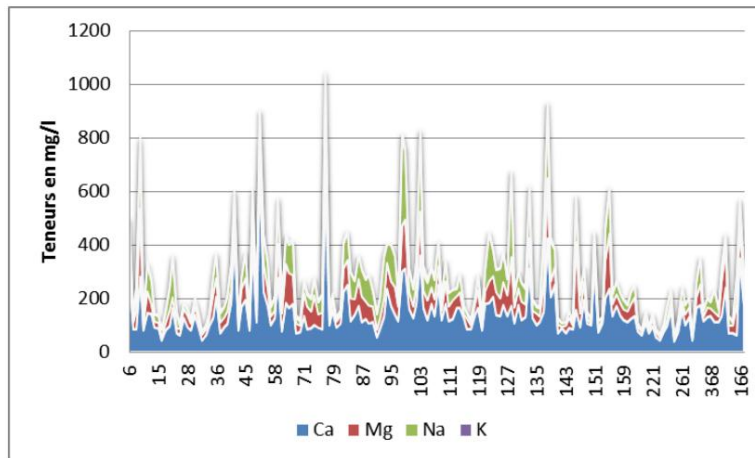


Figure 74 : Concentrations des cations des eaux

II. Classification des eaux :

1. Composition chimique :

Pour mieux avoir une idée sur la chimie des eaux, on a réalisé un diagramme radial (Figure 75) à partir des moyennes des éléments majeurs analysés en mg/l. Ce diagramme montre que ces eaux ont des teneurs :

- Élevées en : Sulfates et Bicarbonates
- Moyennes en : Calcium, Chlorures, Sodium, Magnésium et Nitrates
- Faibles en : Potassium

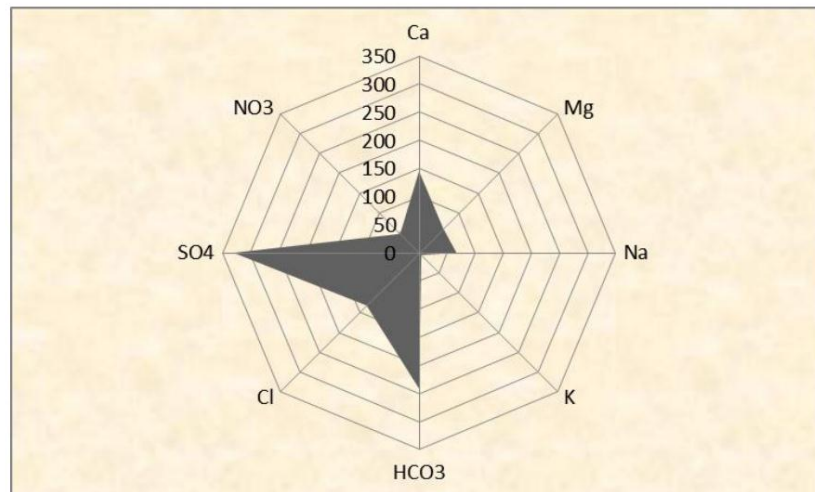


Figure 75 : Composition chimique des eaux

2. Faciès chimiques :

Les faciès hydrochimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en meq/l), et en tenant compte de la classification des ions (formule ionique) (voir Annexe V).

2.1 Représentation graphique des faciès chimiques :

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper et à celui de Schoeler-Berkaloff. La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes.

2.1.1 Diagramme de Piper :

La présentation des analyses chimiques sur ce type de diagramme (Figure 76) permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines. Les anions les plus dominants sont les sulfates et les bicarbonates ainsi les cations sont le calcium et le magnésium ce qui donne des types sulfatés calcique et magnésium aux eaux du synclinal d'Aflou.

2.1.2 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 (Figure 77) ont permis d'identifier les grandes familles chimiques qui sont mentionnées dans le tableau 53.

Tableau 53 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de Schoeller –Berkaloff

Faciès chimiques	Sous-famille	Pourcentage	
Famille des eaux sulfatées	Sulfatée calcique	40,23	51,47
	Sulfatée magnésienne	10,65	
	Sulfatée sodique	0,59	
Famille des eaux bicarbonatées	Bicarbonatée calcique	38,46	40,23
	Bicarbonatée magnésienne	1,77	
Famille des eaux chlorurées	Chlorurée calcique	6,50	8,27
	Chlorurée magnésienne	1,77	

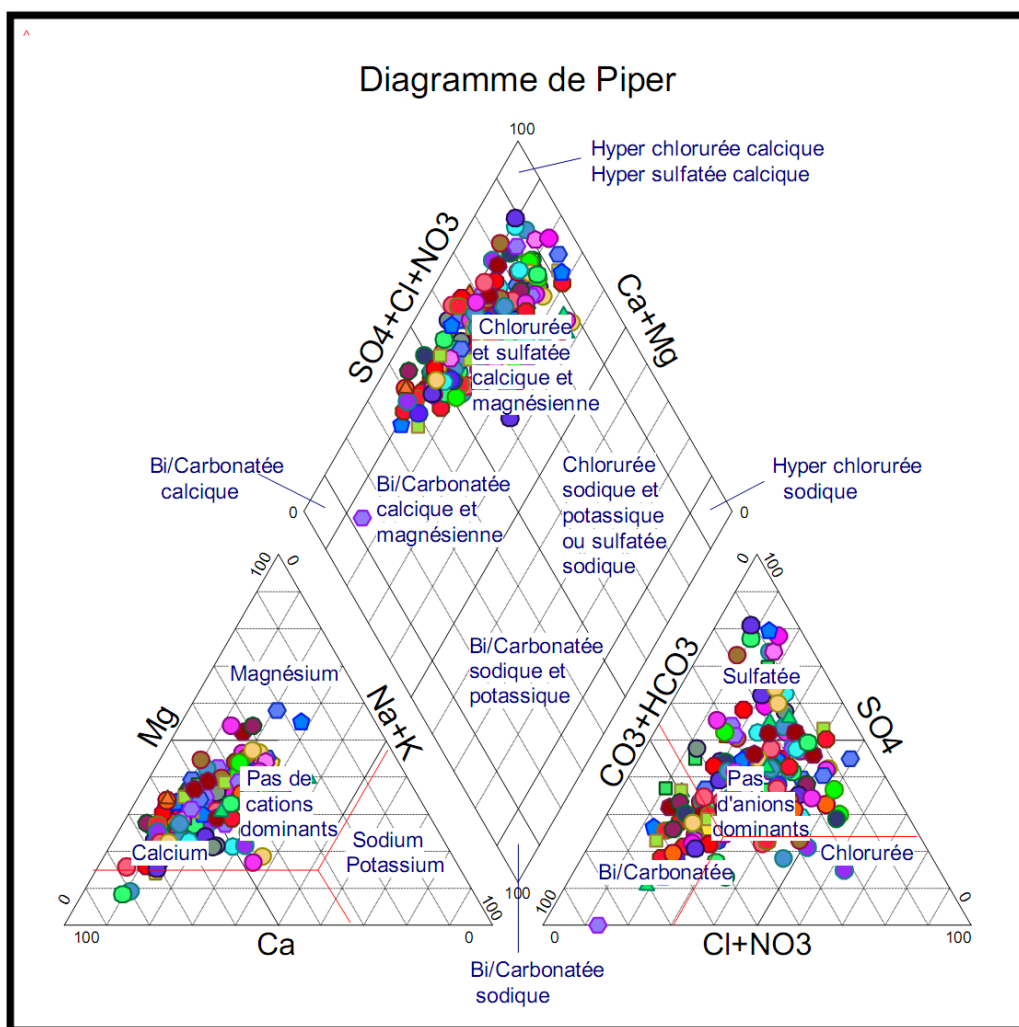
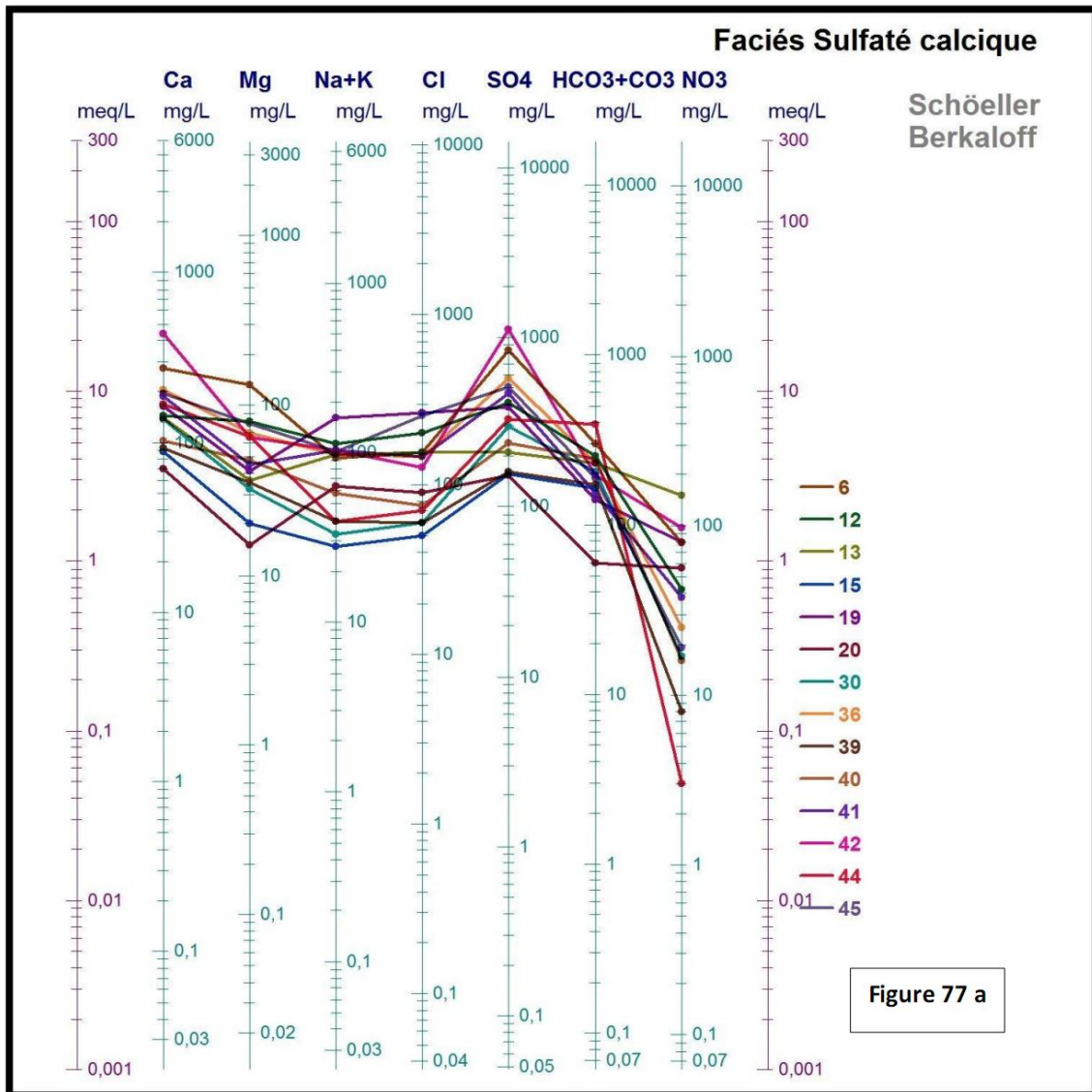
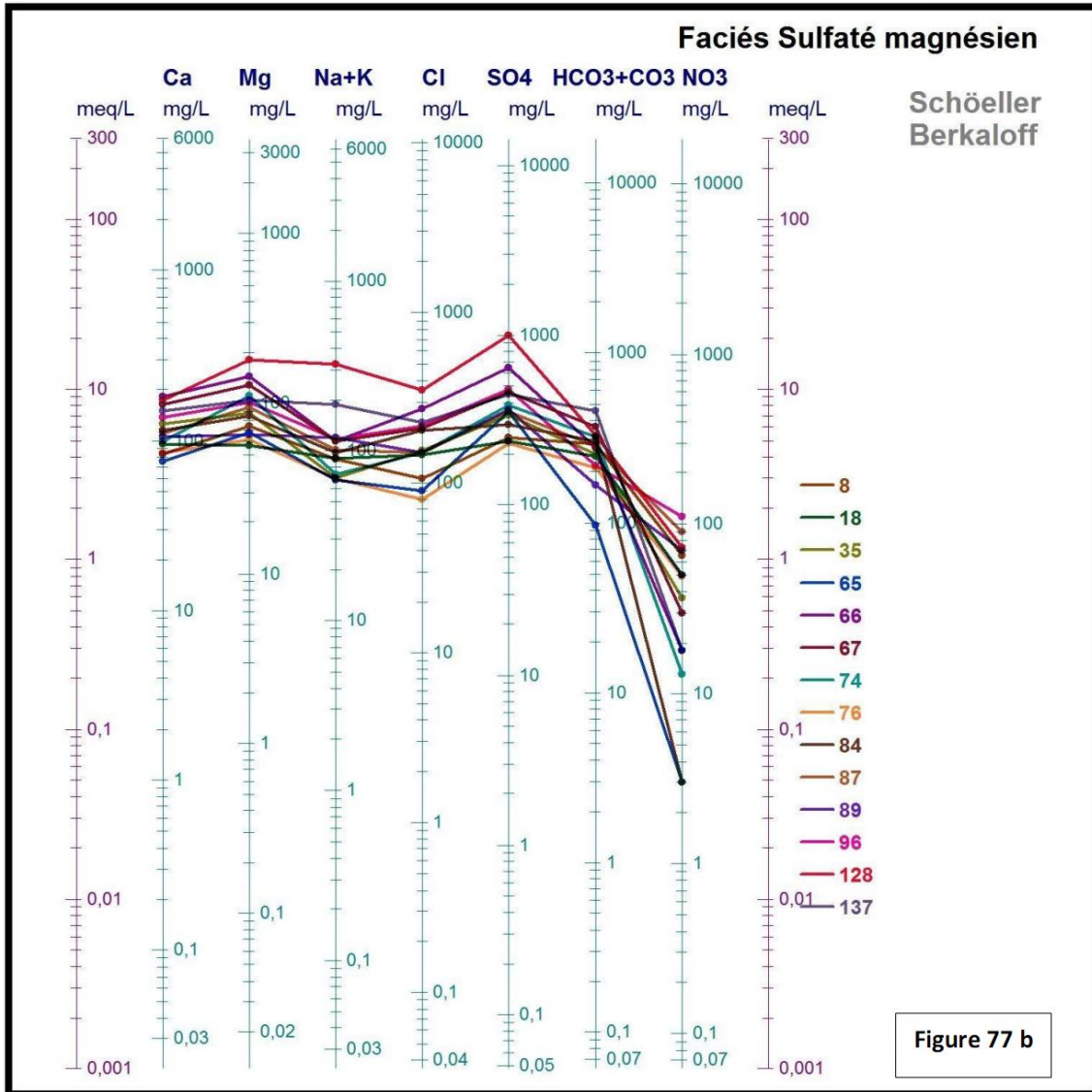
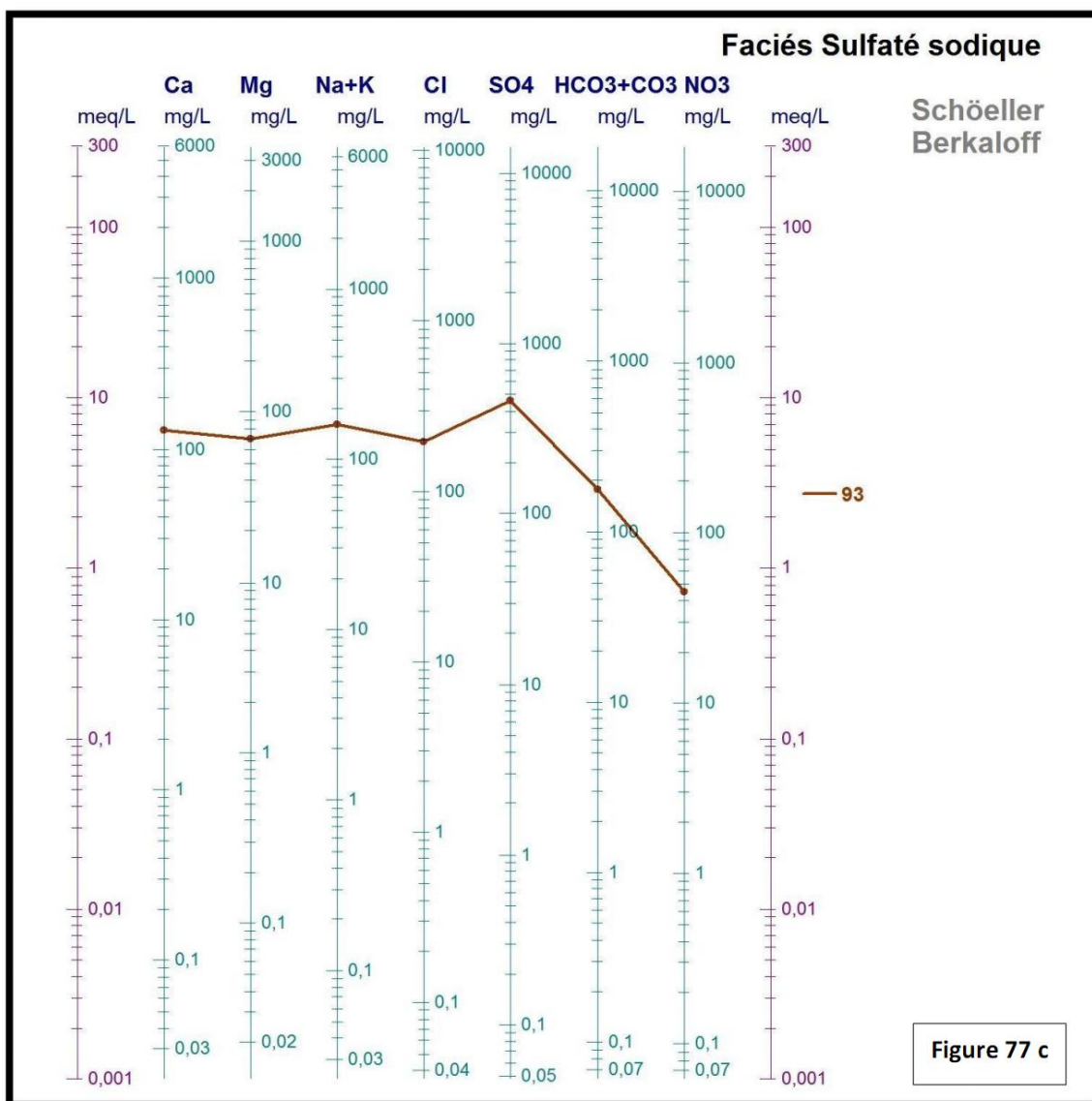
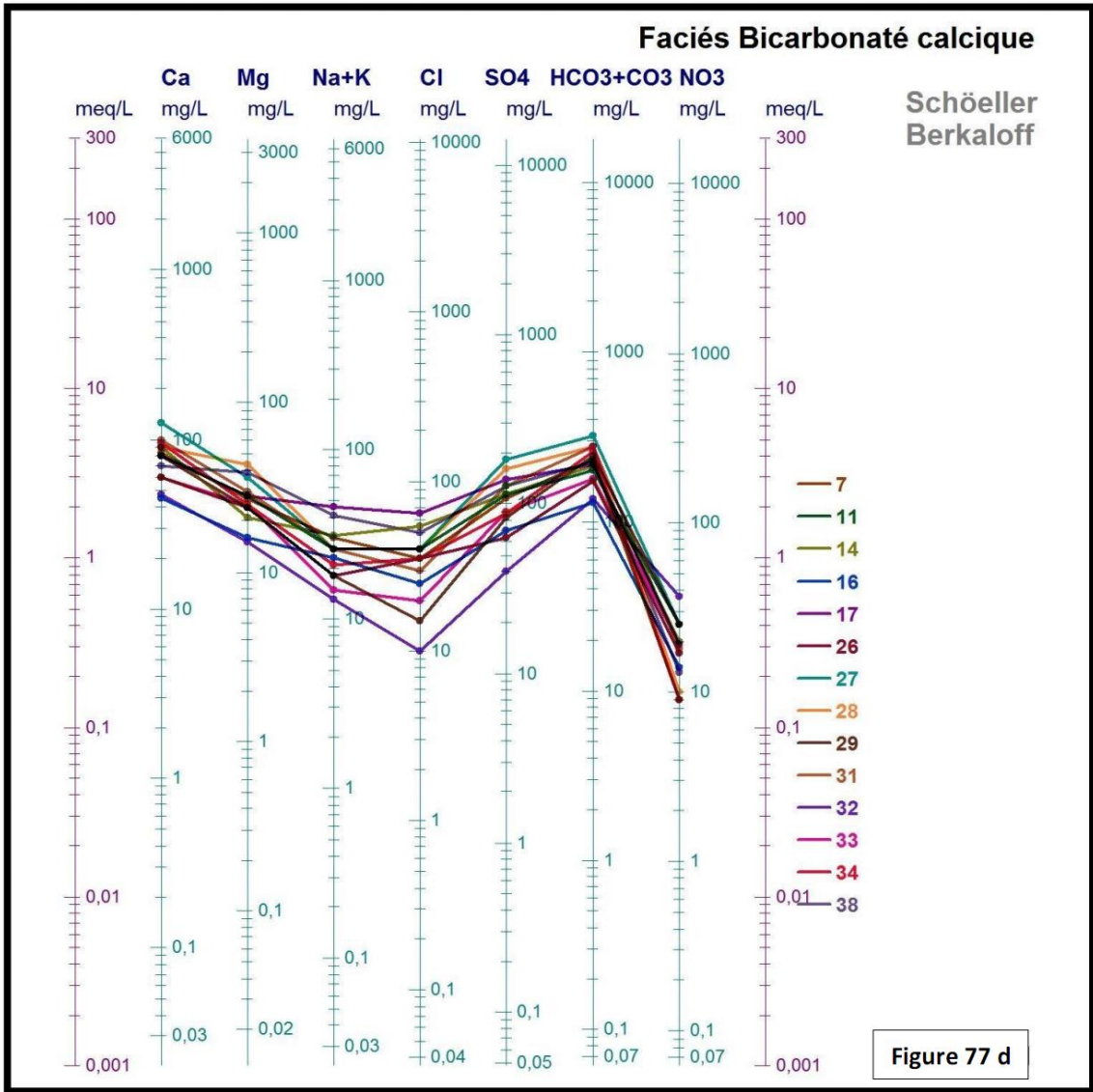


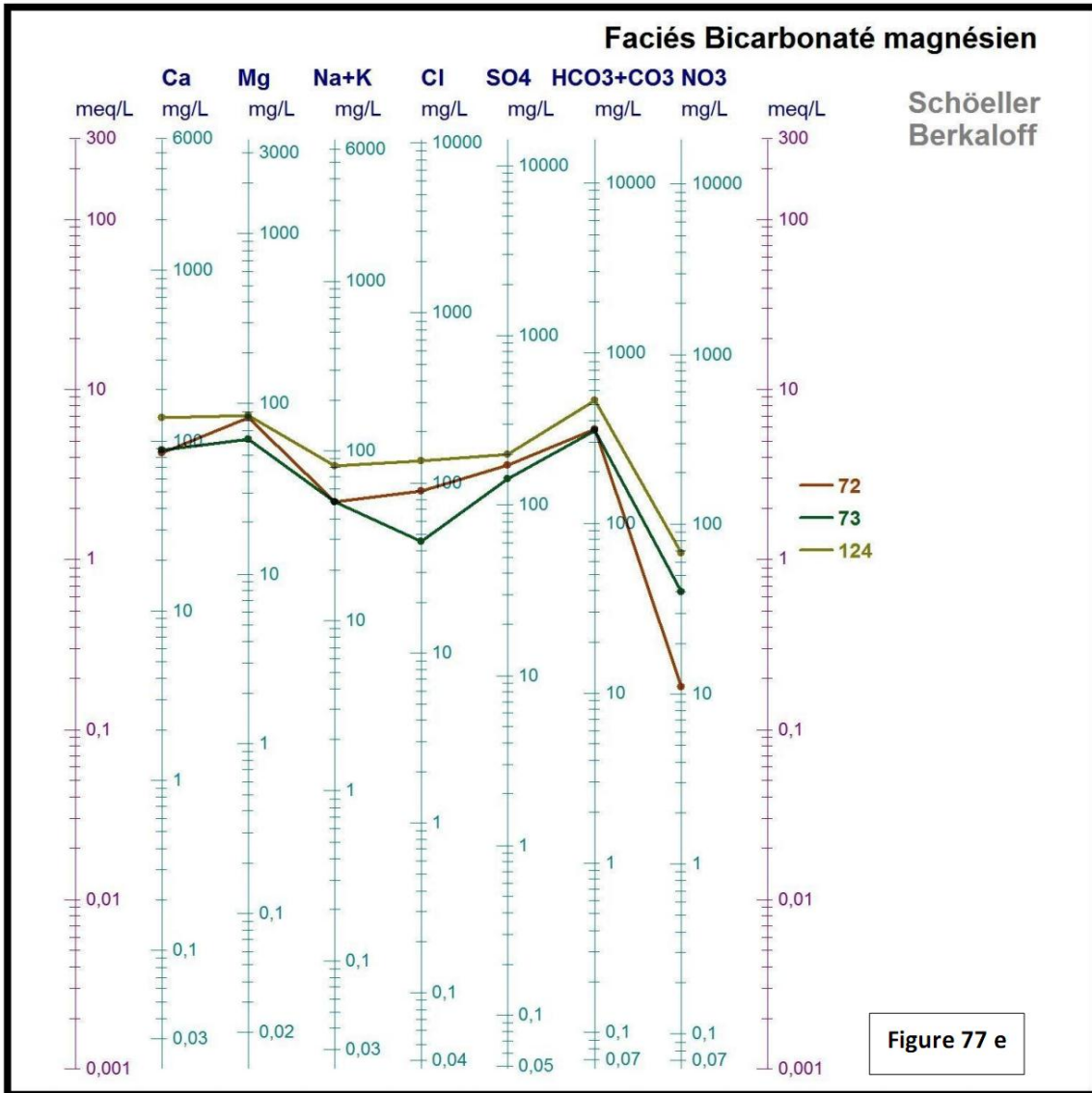
Figure 76: Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Piper

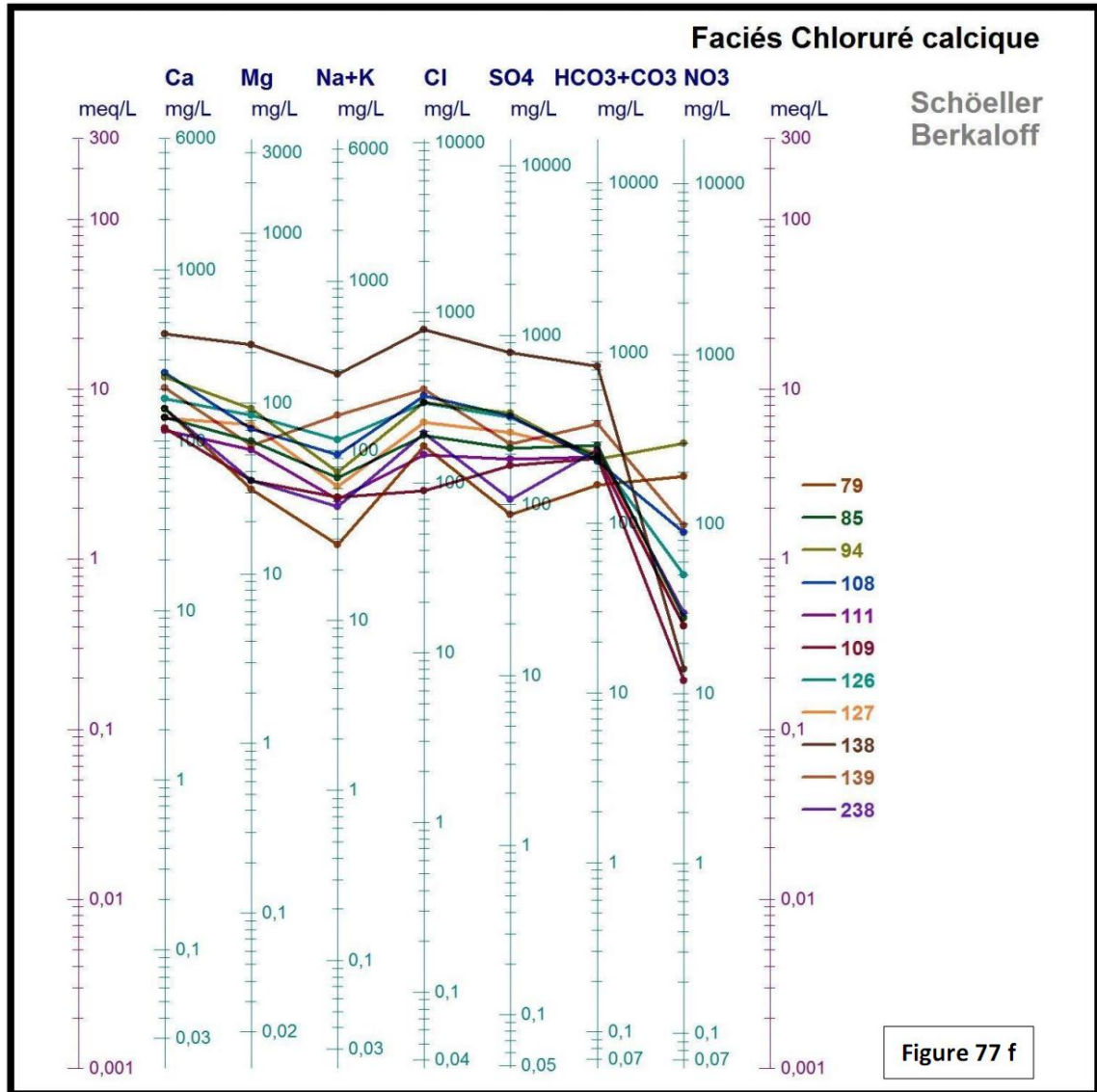












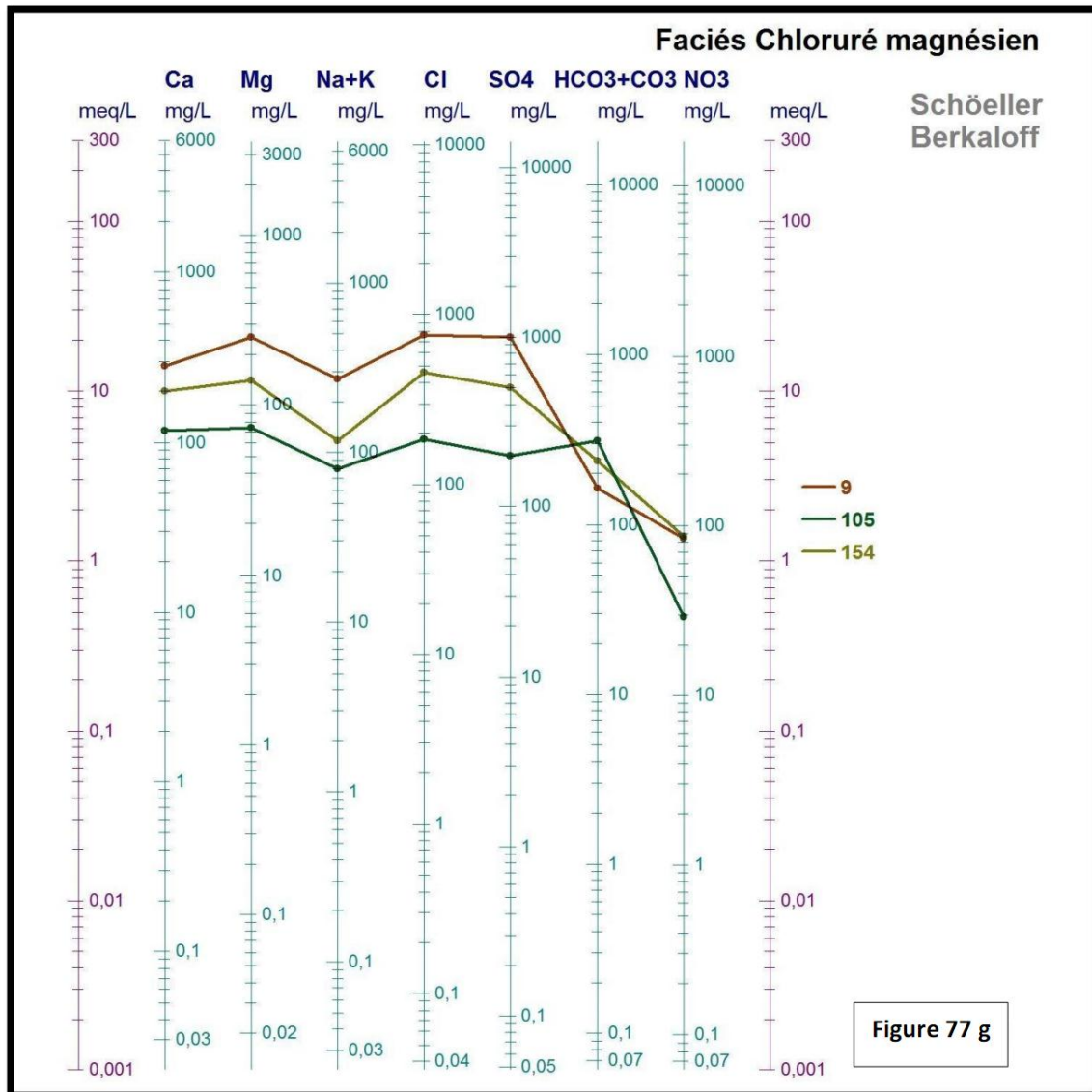


Figure 77 (a, b, c, d, e, f, g): Représentation graphique des analyses d'eau du synclinal d'Aflou à l'aide du diagramme de Schoeller -Berkaloff

À première vue, on remarque une dominance des bicarbonates et des sulfates qui semblent être liées à la géologie. Ces deux éléments accompagnent tantôt le calcium, tantôt le magnésium.

2.2 Répartition des faciès chimiques :

L'examen de la carte de répartition des faciès des eaux souterraines du synclinal d'Aflou montre l'influence de la lithologie des formations sur les types de faciès (figure 78). En effet, la mise en solution de la matrice calcaire des grès du Barrémien-Aptien-Albien est à l'origine du faciès bicarbonaté-calciq. Le faciès sulfaté calciq tire son origine des niveaux gypsifères du Mio-Plio-Quaternaire d'une part et d'une réalimentation par les eaux de ruissellement chargées en gypse provenant des niveaux évaporitiques des formations Néocomiennes.

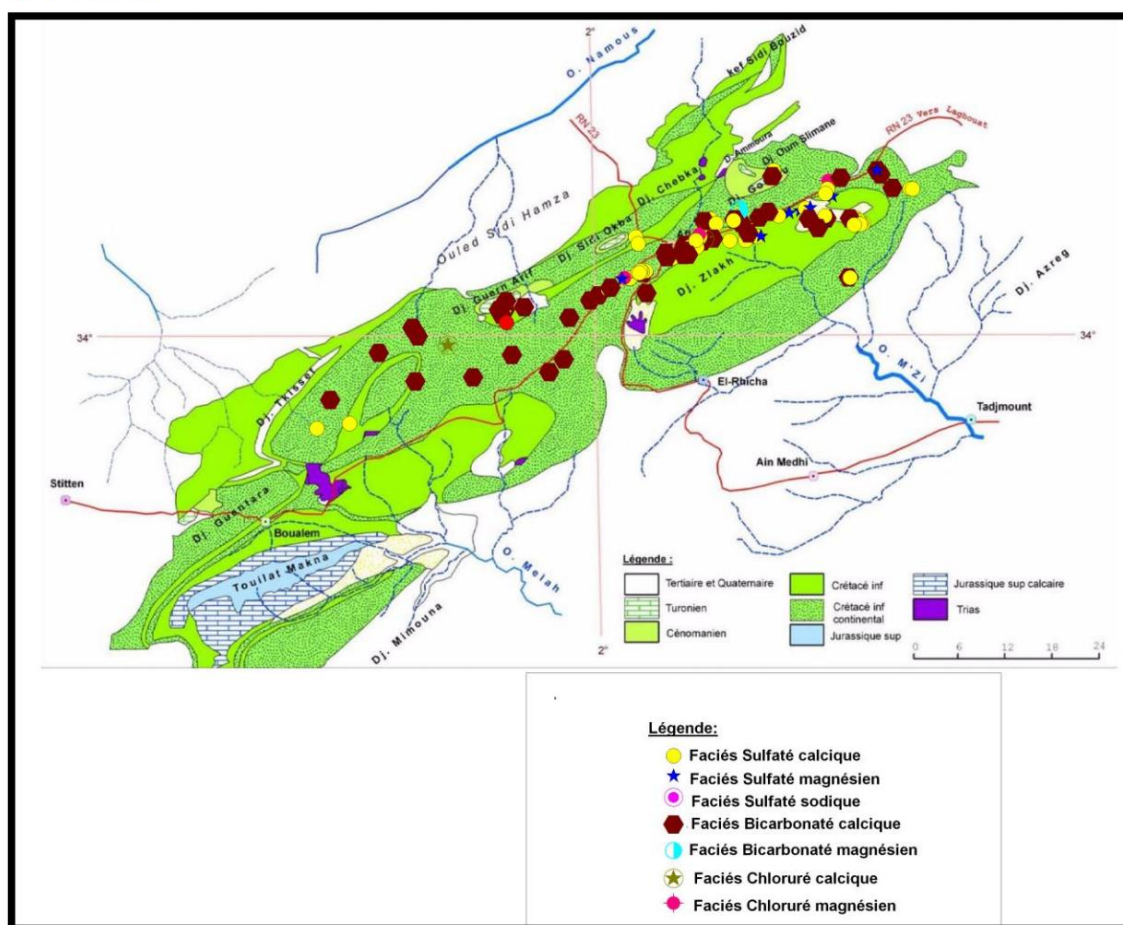


Figure 78 : carte de répartition des faciès chimiques dans le synclinal d'Aflou

3 Dureté des eaux du synclinal d'Aflou :

La dureté d'une eau est due essentiellement à la présence des sels de calcium et de magnésium qui sont des éléments très solubles à l'état naturel.

Pour exprimer la dureté, on a utilisé la formule suivante : $TH = (Ca + Mg) * 5$

Avec : **TH** titre hydrotimétrique en 1°F = 10 mg/l de CaCO₃

Tableau 54: Plage de valeurs du titre hydrotimétrique

TH en °F	0 à 7	7 à 22	22 à 32	32 à 54	+ 54
Eau	douce	Modérément Douce	Assez douce	Dure	Très Dure

Le calcul de la dureté des eaux échantillonnées (Annexe VI) a donné les résultats suivants :

- 5 % des échantillons ce sont des eaux modérément douces
- 17 % des échantillons ce sont des eaux assez douces
- 33 % des échantillons ce sont des eaux dures
- 45 % sont des eaux très dures

Ces résultats ne sont pas étonnants, si on sait qu'il y a des formations géologiques de nature calcaire dans la zone d'étude. En particulier les calcaires du Jurassique et du Néocomien supérieur et la matrice calcaire des grès du Barrémien-Aptien-Albien.

4 Qualité des eaux pour l'irrigation :

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation ; alors que dans les zones semi-arides, où cette ressource est rare ou inexistante, on fait appel aux eaux souterraines. Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols qui peut être apprécié par la conductivité électrique et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué.

Comme la région d'Aflou-El Haoudh est à vocation agricole et les risques de salinisation des sols se font sentir, une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire car cette région se caractérise par une faible pluviométrie, une forte évaporation et une eau souterraine trop chargée en sulfates.

Pour définir la qualité des eaux de la nappe du point de vue irrigation, on a utilisé deux classifications :

4.1 Taux d'absorption du sodium : il est donné par la formule suivante :

$$SAR = Na / \sqrt{[(Ca + Mg)/2]}$$

D'après les résultats concernant le SAR (ANNEXE VII), on constate que la proportion du sodium adsorbée est comprise entre 0,14 et 4,05 ce qui affirme un très faible apport du sodium à la solution du sol selon la classification du SAR (figure 79).

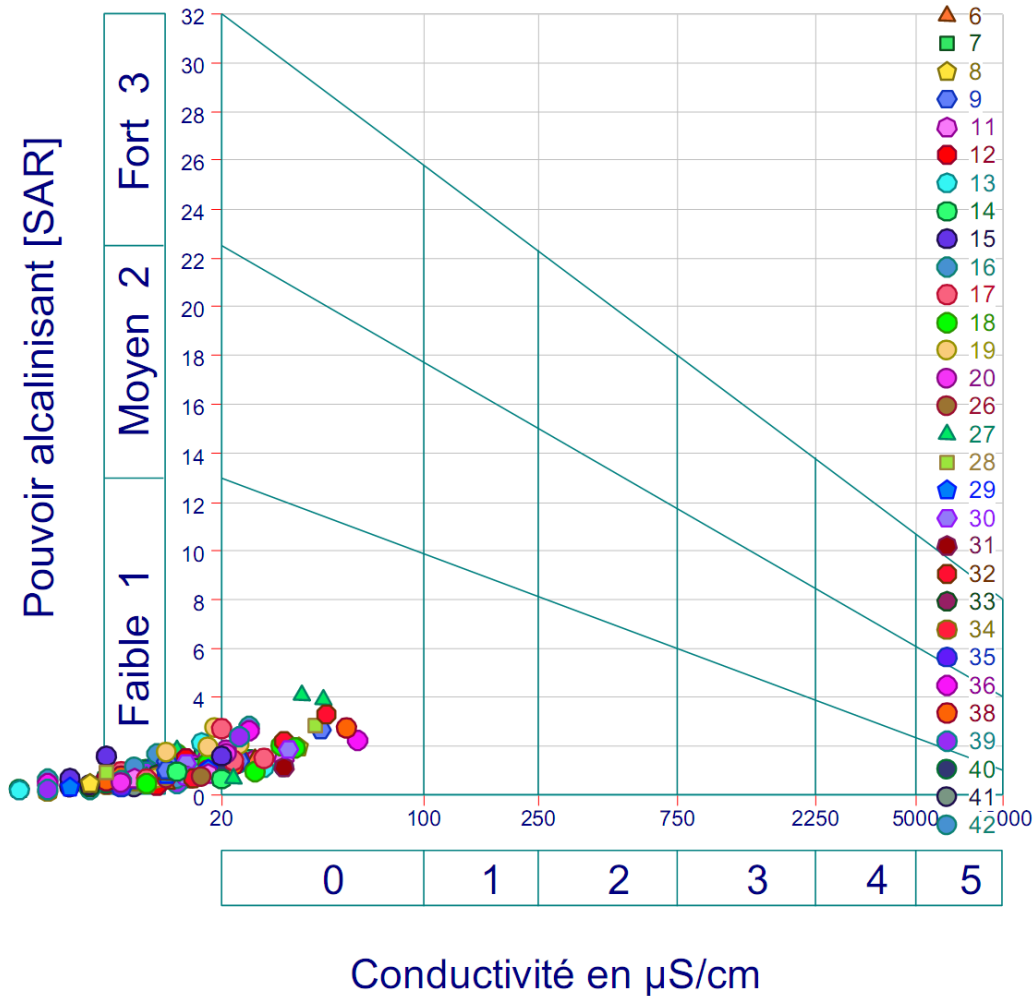


Figure 79: Diagramme de classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R

4.2 Classification de Wilcox :

La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur du sodium dans l'eau, est définie par la formule suivante :

$$\% \text{Na}^+ = \frac{[\text{Na}^+ + \text{K}^+]}{[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+]} * 100$$
 où tous les éléments sont exprimés en meq / l.

Cette classification définit cinq classes d'eau qui sont : Excellente, Bonne, Admissible, Médiocre et Mauvaise. D'après la figure 80 les eaux sont d'excellente qualité.

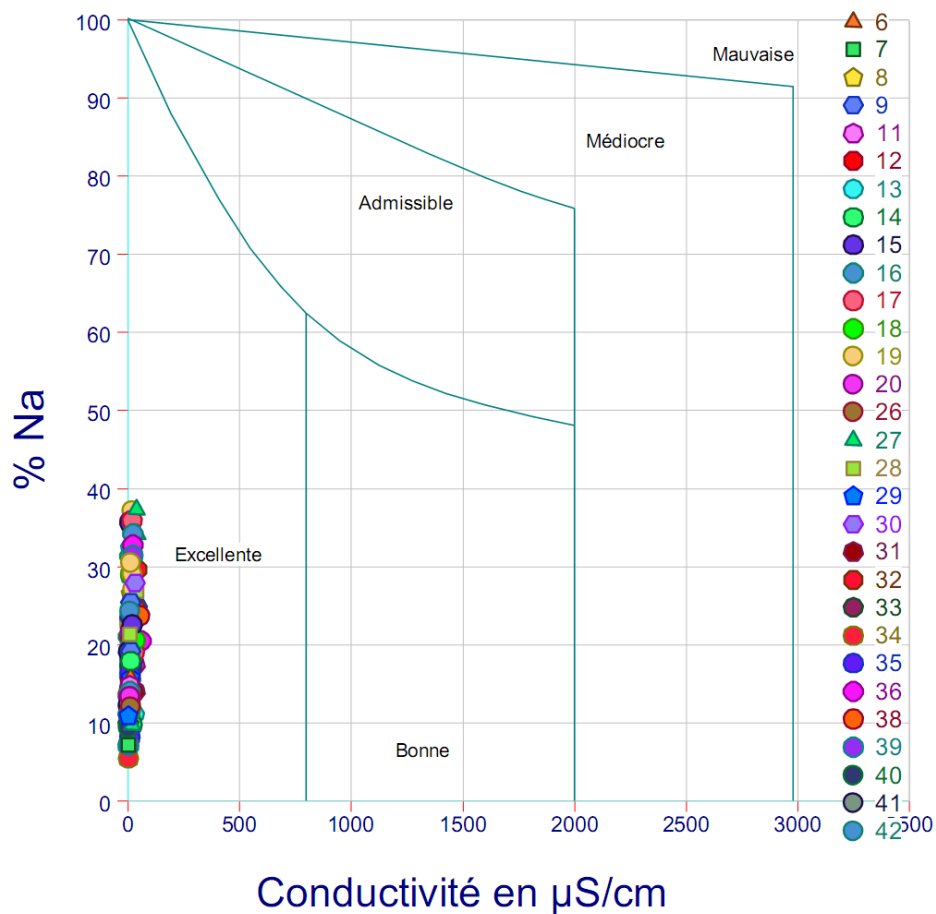


Figure 80 : Diagramme de classification des eaux pour l'irrigation selon la méthode de WILCOX

III. Cartographie hydrochimique :

L'établissement des cartes d'isoteneurs en ion permet d'apprécier la répartition des concentrations et d'expliquer leur origine. Dans notre présente étude, on va cartographier les éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques qui présentent une influence sur la qualité des eaux et qui sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- et NO_3^- .

1. Le calcium (Ca^{2+}) :

Le calcium est un élément alcalinoterreux, il se trouve dans les roches calcaires sous forme de carbonate. Le calcium peut provenir également des formations gypsifères ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) qui sont facilement solubles.

Dans la région d'étude, les teneurs en calcium varie entre 40 et 680 mg/l dont 15 % des points d'eau présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux. La valeur de l'écart-type est relativement importante (91,42), ce qui traduit une grande variation des teneurs, car l'ion Ca^{2+} provient de deux origines naturelles différentes qui sont : la dissolution des formations carbonatées et la dissolution des formations gypseuses.

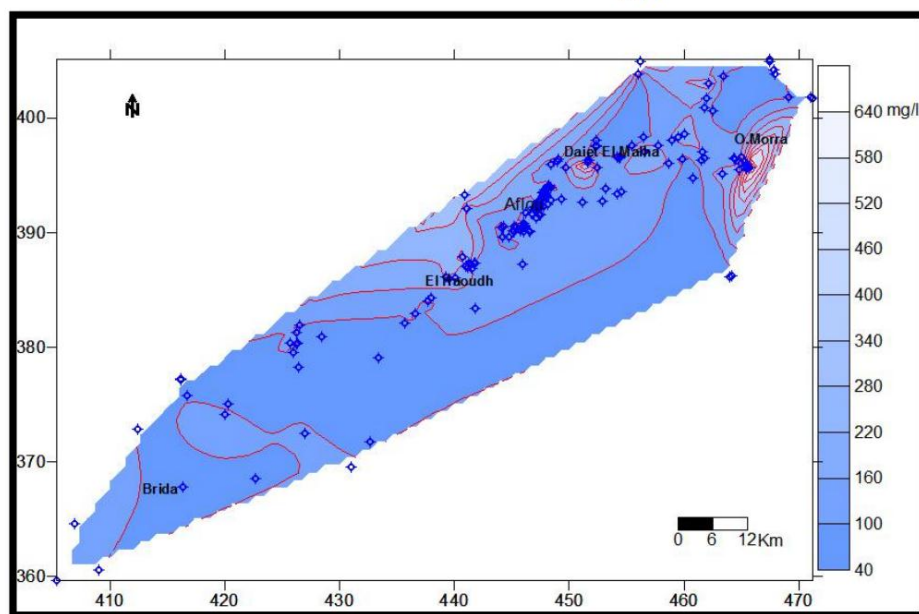


Figure 81 : Carte d'isoteneurs en calcium du synclinal d'Aflou

2. Sodium (Na^+) :

C'est un élément qui est du à la dissolution des évaporites (gypse et halite). Les teneurs du sodium varient entre 5 et 340 mg/l.

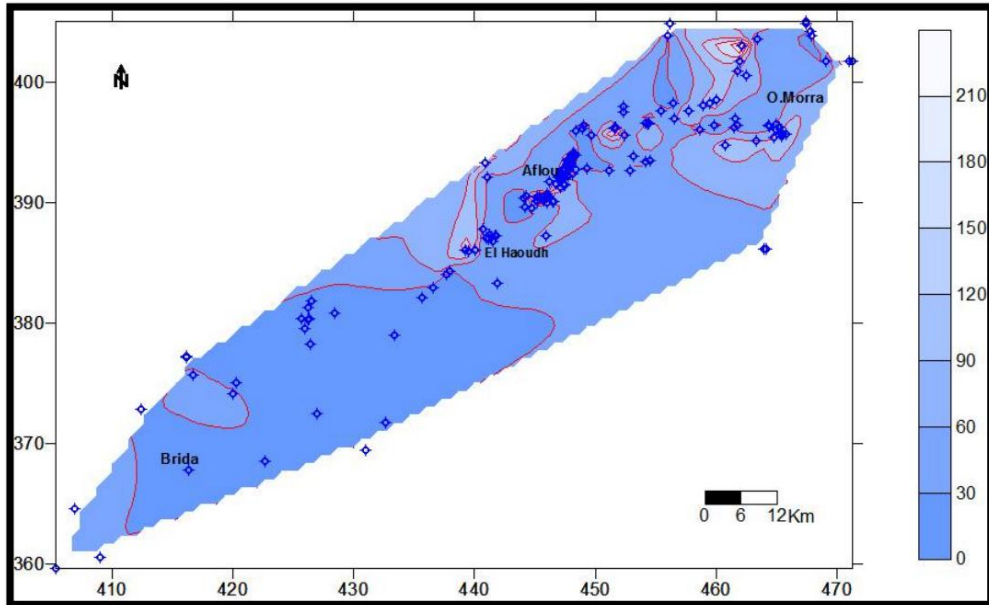


Figure 82 : Carte d'isoteneurs en sodium du synclinal d'Aflou

3. Les sulfates (SO_4^{2-}) :

Ils sont présents dans les eaux naturelles à des teneurs très variables . Ils peuvent provenir de La dissolution du gypse. Comme il peut être associé à des formations plus récentes comme les argiles du Mio-Plio-Quaternaire.

Les résultats des analyses chimiques, donnent un maximum 2090 mg/l. les concentrations en sulfates varient fortement avec un coefficient de variation important avoisinant les 327,30.

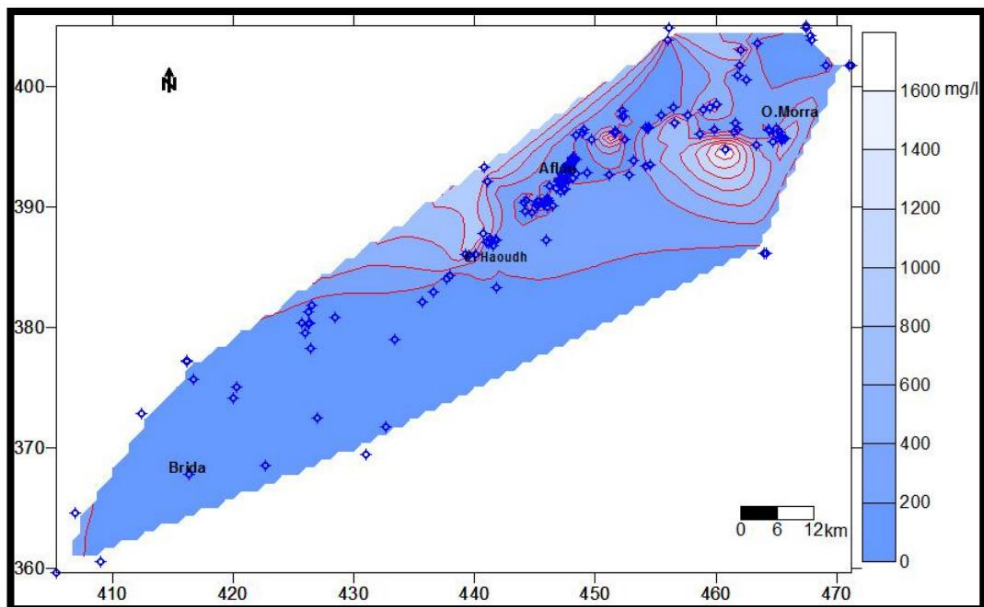


Figure 83 : Carte d'isoteneurs en sulfates du synclinal d'Aflou

4. Les chlorures (Cl) :

Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines et ils sont liés principalement à la dissolution des terrains salifères. Les teneurs varient entre 10 et 795 mg/l.

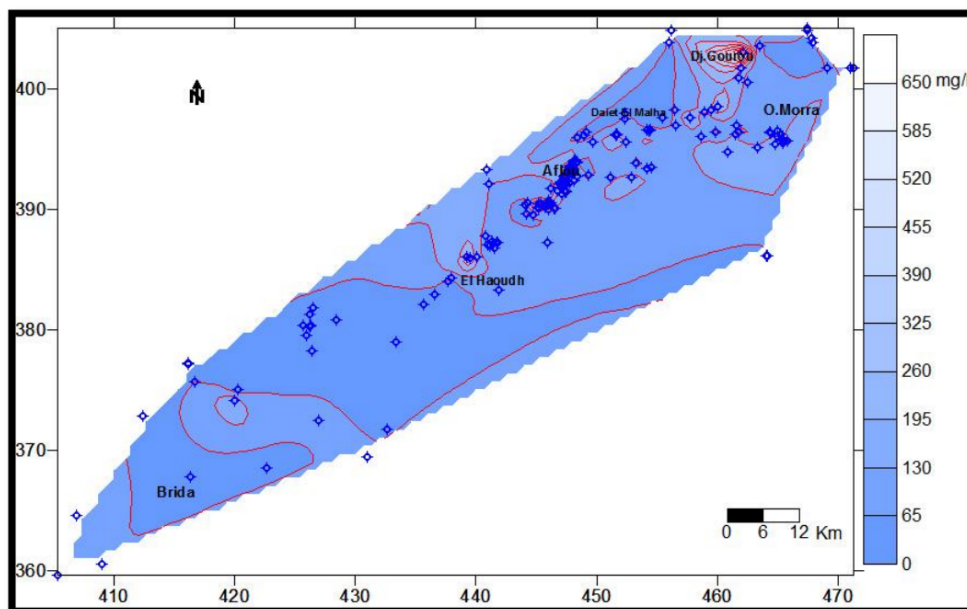


Figure 84 : Carte d'isoteneurs en chlorures du synclinal d'Aflou

Les cartes des figures 81, 82, 83 et 84 montrent une évolution identique avec une augmentation de la concentration d'Ouest en Est et du Nord vers le Sud.

On peut distinguer une zonalité forte caractérisée par trois plages situées respectivement d'Ouest en Est :

- El-Haoudh
- Aflou
- Kef Gourou

Ces fortes concentrations s'expliqueraient par :

- ❖ L'existence d'évaporites englobant à la fois des niveaux gypsifères (CaSO_4) et des intercalations salifères (NaCl et KCl) dans les formations triasiques situées à l'extrémité Est du synclinal d'Aflou (Daiet El Malha : plaine salée), à cet endroit les courbes se ferment autour d'un maximum, juste à proximité et vers le Sud-Ouest un autre maximum apparaît qui serait dû à la dissolution des niveaux gypsifères des formations du Néocomien. Entre ces deux maxima les teneurs observées sont faibles.

Cette situation coïncide avec une ligne de partage des eaux d'où l'augmentation de la concentration au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers l'Est et l'Ouest.

- ❖ **Au niveau d'Aflou** des maxima de moindre importance apparaissent, liés à l'existence d'évaporites présentes dans le Mio-Pliocène ou dans les marnes du Barrémien-Aptien-Albien.
- ❖ **À El-Haoudh** les fortes teneurs sont dues à la dissolution des niveaux évaporitiques du Mio-Pliocène.

Les courbes d'isoteneurs se ferment autour d'un maximum qui coïncide avec une ligne de partage des eaux, et la concentration diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de cette ligne traduisant un mélange avec des eaux moins minéralisées.

5. Le magnésium (Mg^{2+}) :

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium et il provient de la dissolution des formations dolomitiques du Turonien, d'autre part des niveaux évaporitiques du Mio-Pliocène et du Barrémien-Aptien-Albien.

On remarque que la variation des concentrations du magnésium est similaire à celle du calcium. La teneur minimale du Mg est de 6 mg/l et la teneur maximale 256 mg/l.

À l'Est la concentration est de 10 mg/l ; mais en se rapprochant du centre (El-Haoudh) elle augmente brusquement pour atteindre 190 mg/l.

Vers l'Est, les minima coïncident avec les lignes de partage des eaux, et la concentration augmente avec le sens d'écoulement, elle est au maximum à proximité des affleurements du Turonien (lessivage ou mélange d'eaux).

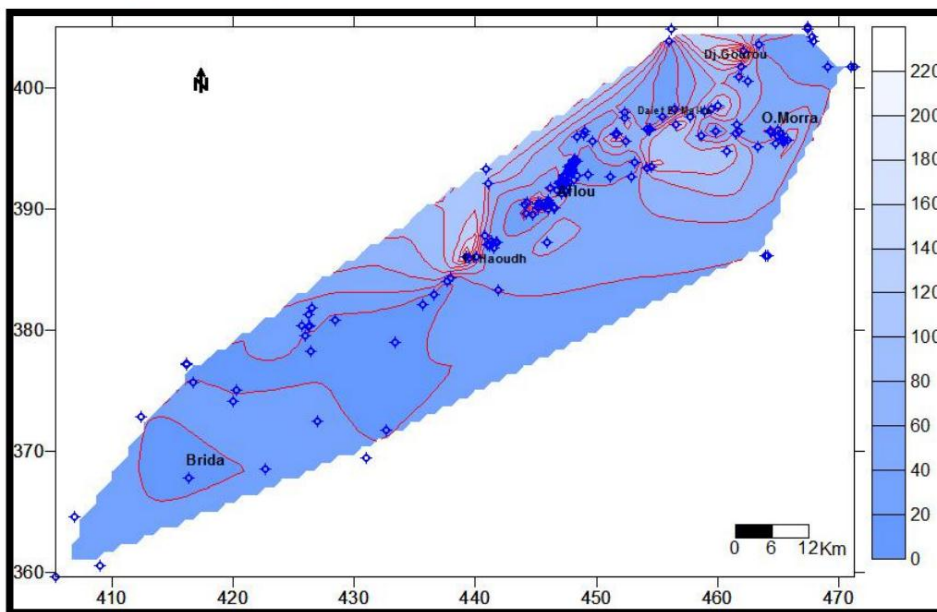


Figure 85 : Carte d'isoteneurs en magnésium du synclinal d'Aflou

6. Le potassium (K^+) :

C'est un élément alcalin, très réactif avec l'eau, il résulte de la dissolution des évaporites (gypse et halite). Le maximum du potassium est de 29 mg/l. Les concentrations varient faiblement (écart type 4,34 mg/l). Les valeurs élevées s'observent au niveau de Djebel Chebka et Dalet El Malha.

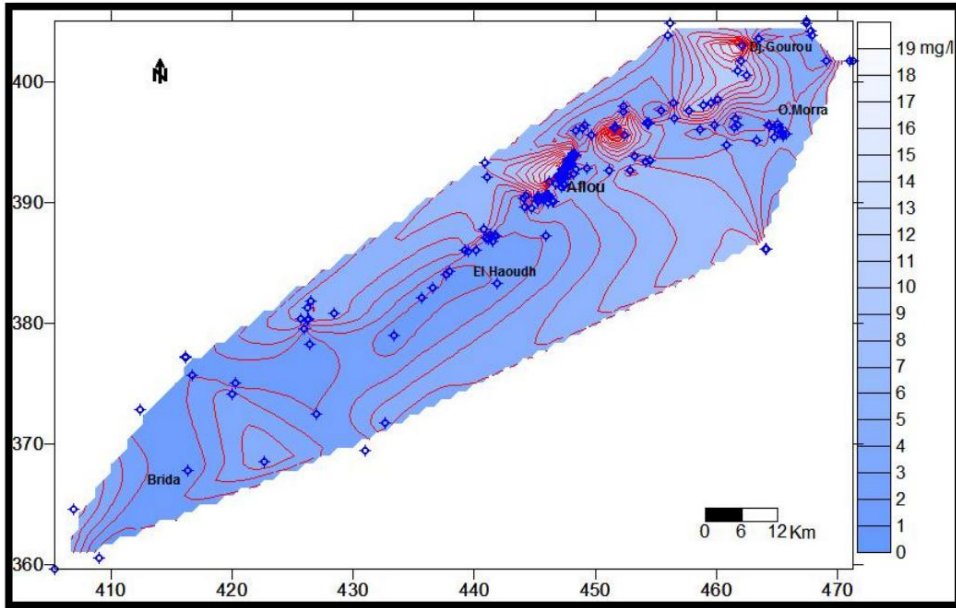


Figure 86 : Carte d'isoteneurs en potassium du synclinal d'Aflou

7. Les Bicarbonate (HCO_3^-):

Les bicarbonates se trouvent dans les eaux naturelles, leur présence dans l'eau est dû à la dissolution des formations carbonatées tel que les calcaires et les dolomies, selon la réaction suivante : $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$

La teneur moyenne est de 255 mg/l, elle augmente dans le sens d'écoulement pour atteindre une valeur de 280 mg/l à El-Haoudh.

Les valeurs les plus élevées s'observent à l'Est avec 827 mg/l et atteignent leurs maximums à proximité des affleurements du Néocomien (mélange d'eaux).

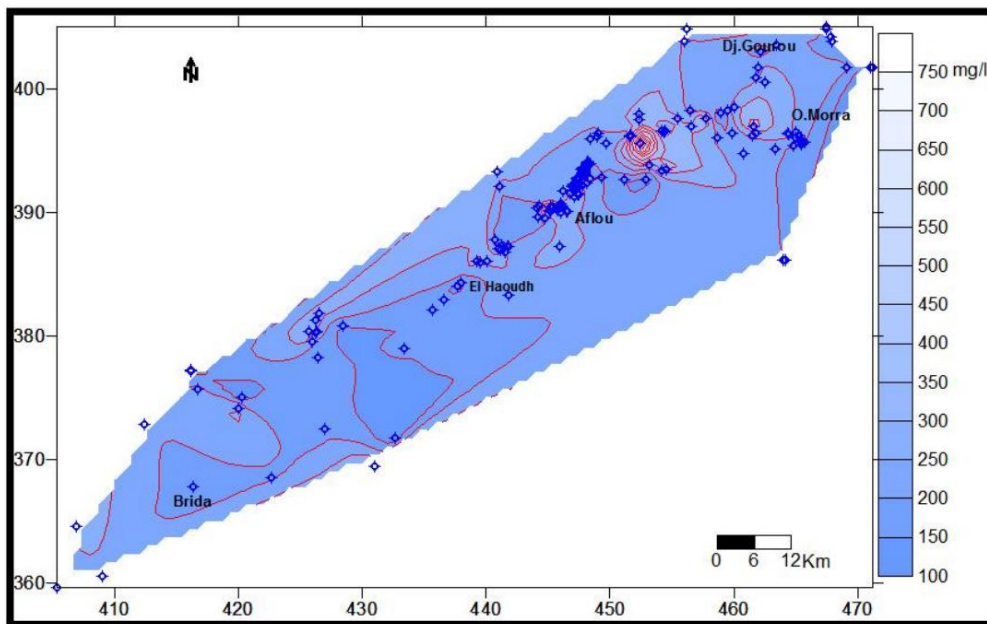


Figure 87 : Carte d'isoteneurs en bicarbonates du synclinal d'Aflou

8. Les Nitrates (NO₃⁻):

Les concentrations les plus élevées s'observent dans à l'Est d'Aflou (Oued Rehamna, Ain Mansour) où dans un secteur où se déverse la majeure partie des eaux résiduaires, la concentration dépasse 300 mg/l. Un maximum secondaire apparaît à El Haoudh que L'utilisation d'engrais dans ce secteur à vocation agricole augmente la teneur en nitrates. Les teneurs élevées sont observées ainsi au niveau du Dj. Gourou.

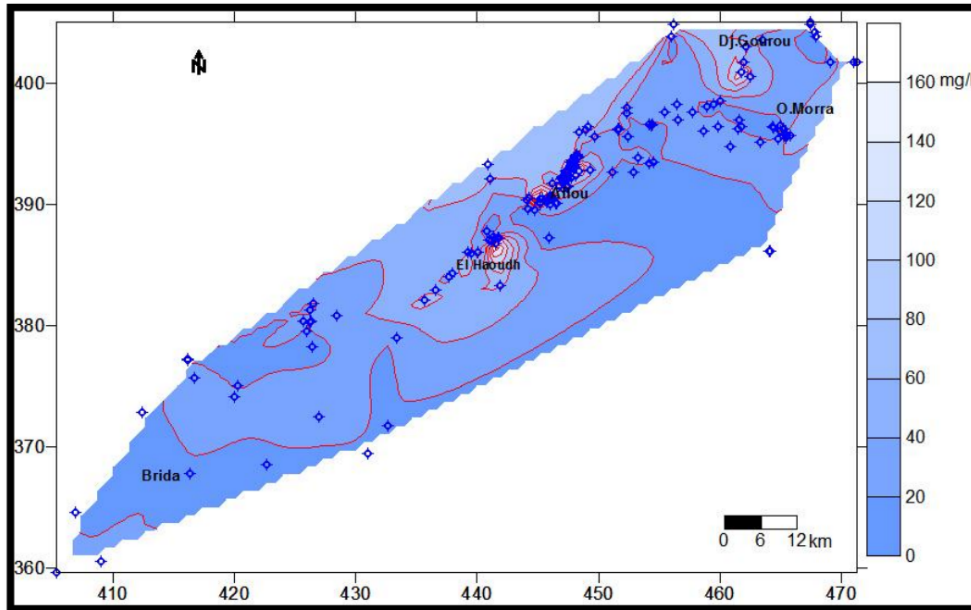


Figure 88 : Carte d'isoteneurs en nitrates du synclinal d'Aflou

IV l'origine du chimisme des eaux souterraines :

1. Faciès chimiques

À partir de la représentation graphique des faciès chimiques par les diagrammes de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff, on a constaté la dominance de 04 faciès qui sont : le Sulfaté calcique, le Bicarbonaté calcique, le Sulfaté magnésien et le chloruré calcique. Ceci est vérifié par les moyennes des teneurs dominantes des ions suivants : Ca²⁺ (7,20 meq/l) ; Mg²⁺ (5,01 meq/l) ; SO₄²⁻ (6,87 meq/l) ; HCO₃⁻ (3,95 meq/l) et Cl⁻ (3,72 meq/l).

La prédominance des anions SO₄ vis-à-vis de HCO₃ et Cl, ainsi que l'abondance des cations Ca et Mg, nous permettent d'établir des diagrammes binaires par les rapports caractéristiques : Ca/Mg versus SO₄/Cl puis Ca/Mg versus SO₄/HCO₃ et Ca/Mg versus HCO₃/Cl pour expliquer l'évolution des faciès géochimiques rencontrés dans les diagrammes de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff.

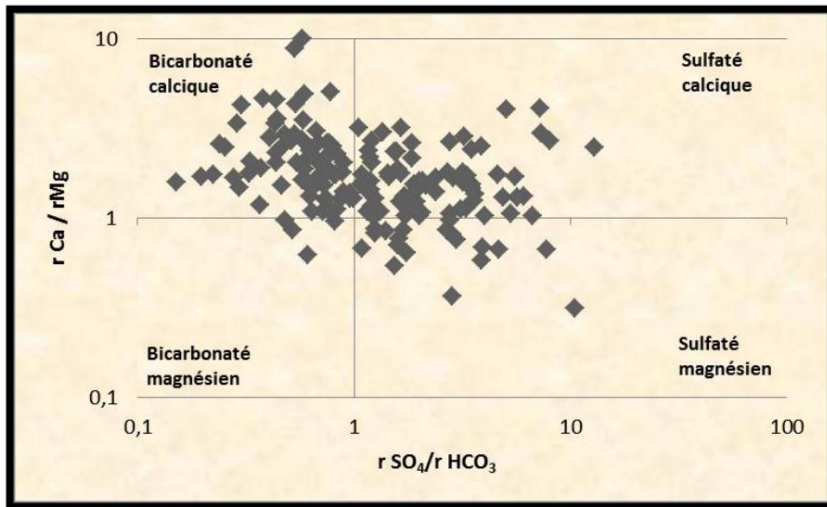


Figure 89 : la relation Ca/ Mg vs SO₄/HCO₃

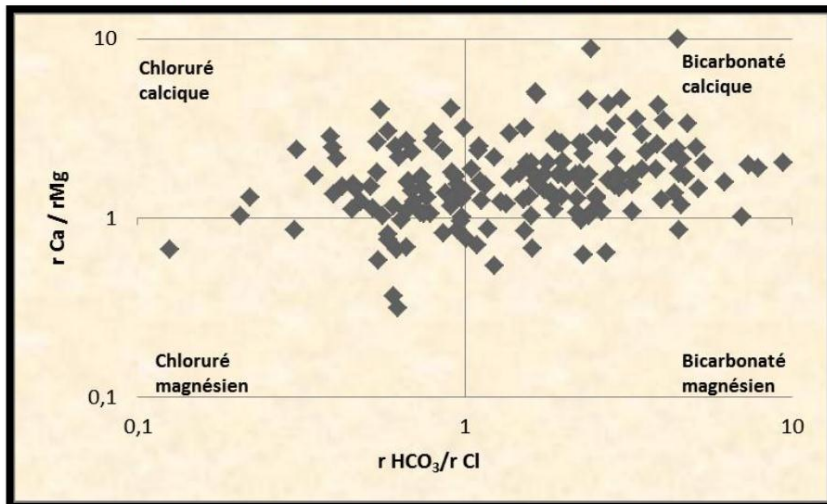


Figure 90 : la relation Ca/Mg vs HCO₃/Cl

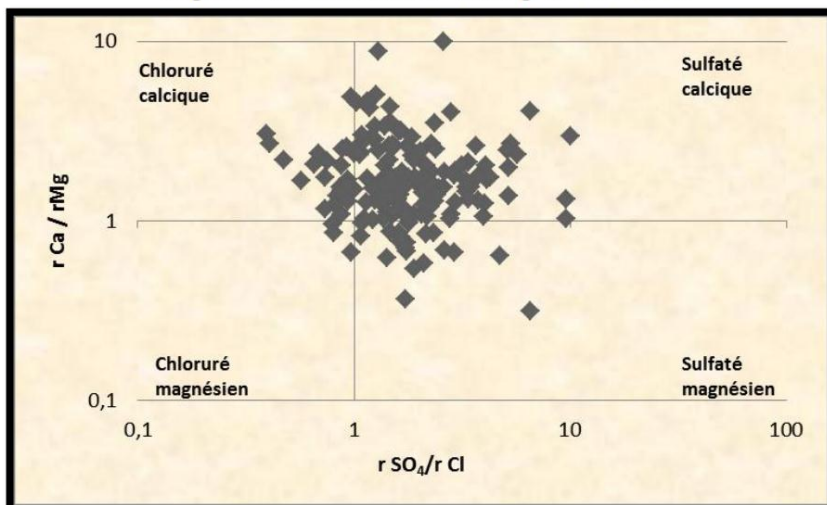


Figure 91 : la relation Ca/Mg vs SO₄/Cl

Les figures 89,90 et 91 reflètent que Le rapport Ca/Mg est supérieur à l'unité pour 83% des échantillons, indiquant un enrichissement en calcium et 14 % des échantillons présentant des valeurs inférieures à 1 ce qui indique un enrichissement en magnésium.

Pour Le rapport SO₄/Cl : 85% des échantillons présentent des valeurs supérieures à l'unité ce qui indique un enrichissement en ion Sulfate. Par contre les 15% de ces échantillons sont inférieurs à l'unité et riches en ion chlore.

Pour le rapport HCO₃/Cl : 38% des échantillons sont inférieurs à l'unité indiquant un enrichissement en chlore par contre les 62 % sont plus riches en bicarbonate.

En ce concerne le rapport SO₄/HCO₃ environ 56 % présentent des valeurs supérieures à l'unité qui sont riches en sulfate.

L'interprétation de ces trois diagrammes a montré la concentration des rapports d'ions en 04 pôles indiquant les faciès déterminés précédemment qui caractérisent le synclinal d'Aflou.

2. Rapports caractéristiques :

L'étude des rapports caractéristiques les plus courants en hydrochimie permet de préciser le milieu de provenance des eaux souterraines et de comparer leur concentration en éléments chimiques. L'étude a concerné le rapport : Cl/HCO₃(les deux rapports SO₄/Cl et Ca /Mg étudiés précédemment).

- **r Cl / r HCO₃** : le rapport est inférieur à l'unité dans les formations gréseuses (mise en solution de la matrice calcaire), il est supérieur à 1 dans les formations du Mio-Pliocène suite à un enrichissement en chlorures (mise en solution des évaporites).

Le maximum se situe à l'Est où le rapport est de six en raison d'une contamination par les eaux très saumâtres du Trias que l'on peut reconnaître au pied de Dj Gourou.

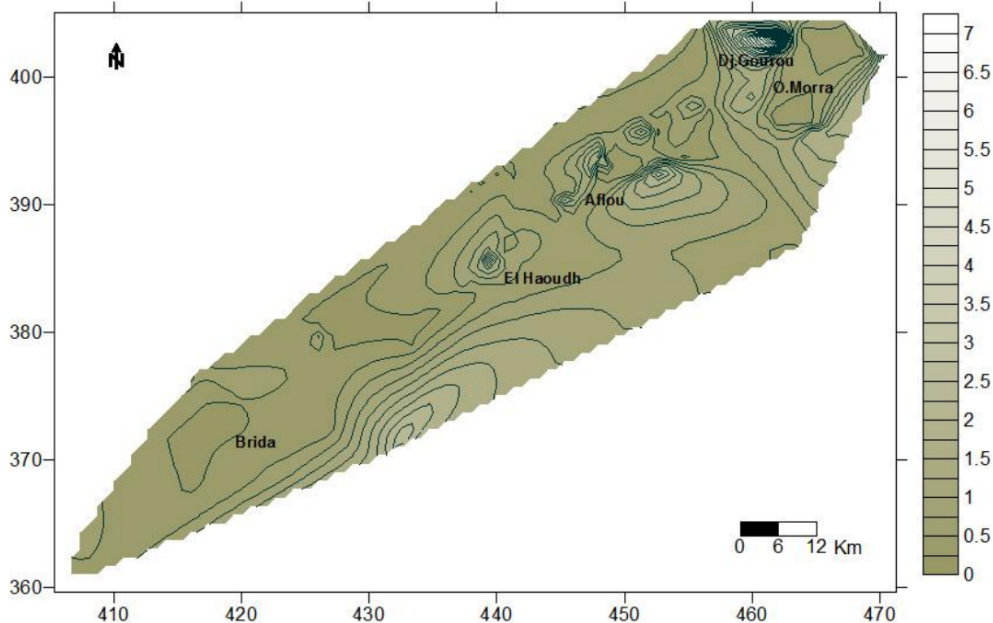


Figure 92 : carte des isoteneurs en rCl / r HCO₃

3. Évolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux prépondérants (évaaporites et carbonates) :

La formule de calcul de l'indice de saturation de différents minéraux dans l'eau est la suivante :

$$IS = \log (IAP / K)$$

Où : **IAP** est le produit de l'activité ionique

K : constante d'équilibre

Une simulation a été faite sur le logiciel Phreeq à partir de Diagramme, pour le calcul des indices de saturation (ANNEXE VIII).

Tableau 55 : Paramètres statistiques des indices de saturation

Indices de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne
Is Calcite	-0,54	1,37	0,62
Is Aragonite	-0,68	1,23	0,48
Is Dolomite	-1,29	2,58	1,17
Is Gypse	-2,32	0,48	-0,95
Is Anhydrite	-2,55	0,26	-1,17

Pour les évaporites, on a choisi le gypse ($Ca SO_4 2H_2O$) et l'anhydrite ($Ca SO_4$) pour illustrer cette évolution, la Figure 93 indique que les eaux échantillonnées sont sous-saturées vis-à-vis le gypse et l'anhydrite. Ces résultats laissent supposer que la salinité des eaux peut encore augmenter.

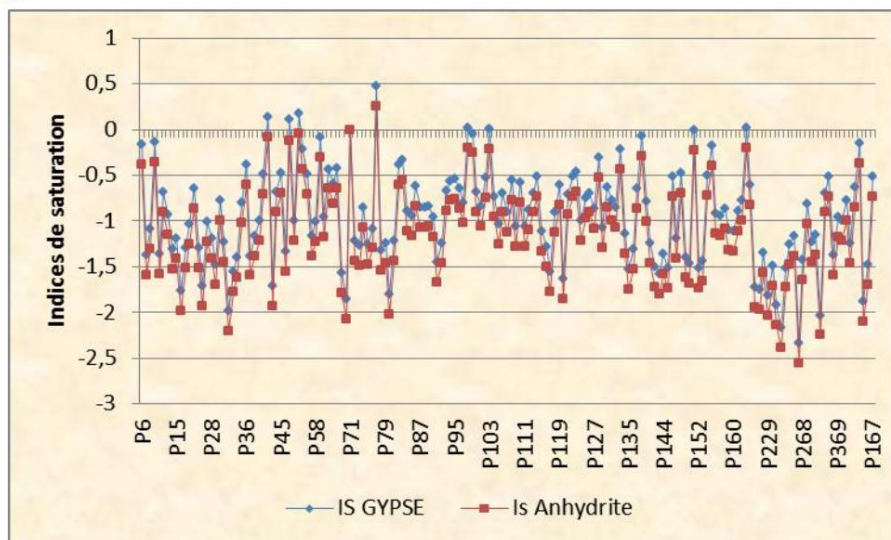


Figure 93 : Évolution des Indices de saturation (gypse et anhydrite)

Pour les carbonates, on a choisi la calcite, la dolomite et l'aragonite. La figure 94 indique la sursaturation des eaux échantillonnées vis-à-vis de la dolomite et la calcite et par un degré plus vis-à-vis de l'aragonite.

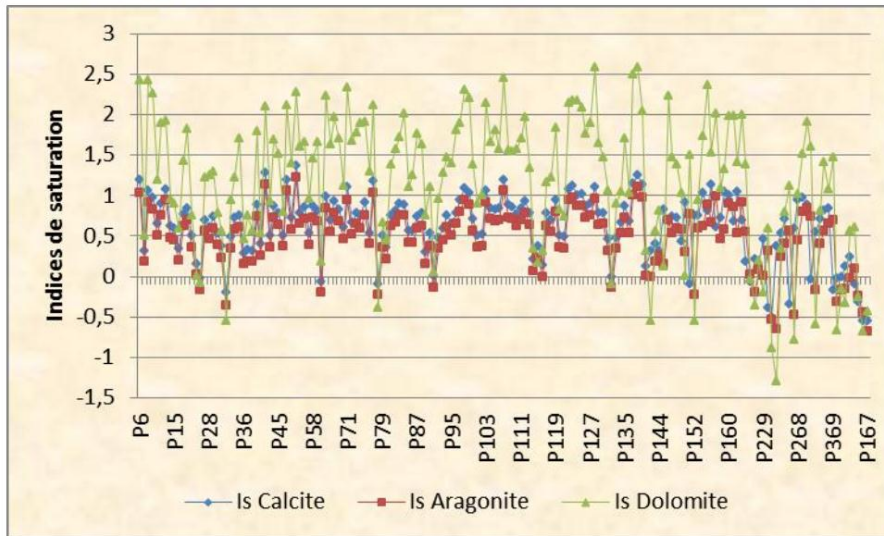


Figure 94 : Évolution des Indices de saturation (calcite, dolomite et l'aragonite)

En résumé, l'interprétation des figures a permis de montrer l'influence des minéraux évaporitiques sur le chimisme de l'eau. La sous-saturation en gypse et anhydrite provoque une continuité dans la dissolution et un enrichissement des eaux par ces éléments. Par ailleurs, les minéraux carbonatés se trouvent parfois proches de l'équilibre souvent en sursaturation et tendent vers la précipitation sous forme de calcite et dolomite.

4. Mise en évidence des échanges de base :

Les eaux souterraines au cours de leurs trajets souterrains, se chargent de plus en plus en matières dissoutes, elles rentrent en contact avec des substances ayant la propriété d'échanger leurs ions contre ceux de l'eau. L'indice d'échange de base (IEB) défini par H. Schoeller en 1934 est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau. Il est donné par l'expression suivante:

$$I.E.B = \frac{rCl - (rNa + rK)}{rCl}$$

Cet indice définit le sens d'échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants, Si :

- IEB = 0 —————> pas d'échanges
- IEB < 0 —————> Ca²⁺ et Mg²⁺ sont échangés par Na⁺ et K⁺
- IEB > 0 —————> Na⁺ et K⁺ sont échangés par Ca²⁺ et Mg²⁺

Le calcul du pourcentage des valeurs de l'indice d'échange de base (ANNEXE IX) montre que 30,76 % des échantillons ont un I.E.B négatif, le reste des échantillons sont positifs mais toujours proches du zéro.

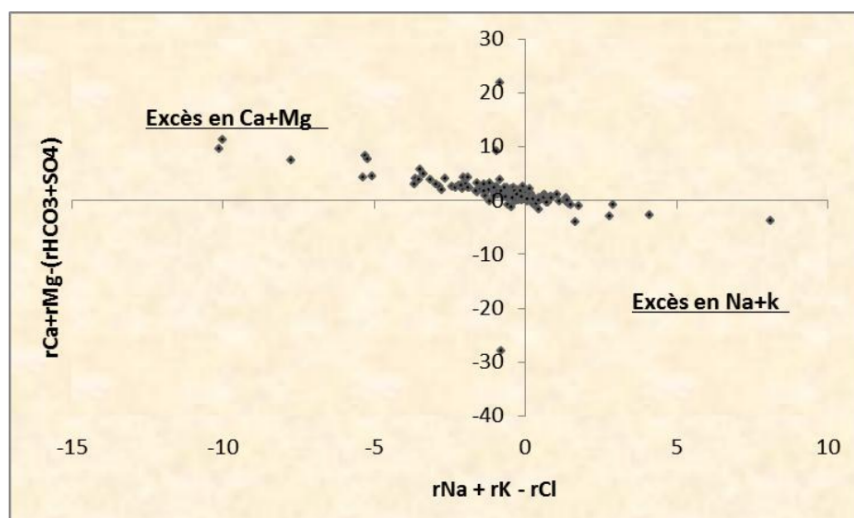


Figure 95 : La relation entre $(Ca+Mg-HCO_3-SO_4)$ et $(Na +K -Cl)$ dans les eaux du Barrémien-Aptien-Albien

Le graphique ci-dessus montre deux cas de figure :

- ✚ les échantillons où il y a un excès en $(Ca + Mg)$ par rapport aux (HCO_3+SO_4) et un déficit en $(Na + K)$ par rapport aux Chlorures (Cl) , c'est la lithologie caractérisée par la dominance des formations évaporitiques qui contrôle l'enrichissement des eaux en ces éléments $(Ca$ et $Mg)$ et cela caractérise la majorité des échantillons.
- ✚ les échantillons qui présentent un déficit en $(Ca + Mg)$ et un excès en $(Na + K)$, ce phénomène est toujours contrôlé par la lithologie, mais cette fois ci celle caractérisée par l'abondance des argiles par rapport aux autres formations lithologiques dans la région, ce qui favorise l'change de bases entre les eaux et les formations argileuses.

5. Analyse en composantes principales ACP :

5.1 Principe :

L'analyse statistique par composantes principales permet de déterminer les différentes liaisons entre plusieurs variables et de mettre en évidence les associations possibles. Elle est descriptive et l'objectif est de présenter sous forme graphique, le maximum d'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des « individus » sur lesquels sont mesurées des « variables quantitatives » disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières.

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

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

5.2 Interprétation :

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 « des pourcentages de variation expliqués par chaque composante principale ».

Sur chaque plan retenu, on regarde :

- 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.

5.3 Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux souterraines du synclinal d'Aflou :

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur un tableau de données de 14 variables (Cond, pH, teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- Is calcite, Is Dolomite, Is Aragonite, Is Gypse et Is Anhydrite) et de 171 individus. L'interprétation de l'analyse se fera selon l'ordre des informations données par le logiciel XLSTAT.

5.3.1 Matrice de corrélation:

Dans le tableau 56 les valeurs des coefficients de corrélation entre les différents éléments chimiques sont représentées.

Tableau 56 : Matrice de corrélation des éléments chimique

Variables	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	Cond	Is Calcite	Is Aragonite	Is Dolomite	Is Gypse	Is Anhydrite	pH
Ca	1														
Mg	0,60	1													
Na	0,64	0,82	1												
K	0,36	0,34	0,411	1											
HCO3	0,24	0,45	0,35	0,096	1										
Cl	0,60	0,79	0,83	0,36	0,36	1									
SO4	0,77	0,77	0,76	0,41	0,17	0,59	1								
NO3	0,16	0,30	0,19	0,008	0,07	0,23	0,10	1							
Cond	0,80	0,89	0,90	0,42	0,39	0,83	0,89	0,26	1						
Is Calcite	0,54	0,45	0,45	0,24	0,48	0,43	0,34	0,22	0,51	1					
Is Aragonite	0,54	0,45	0,46	0,24	0,48	0,43	0,35	0,22	0,51	1,00	1				
Is Dolomite	0,49	0,59	0,54	0,27	0,54	0,50	0,42	0,24	0,58	0,96	0,96	1			
Is Gypse	0,81	0,75	0,73	0,38	0,29	0,65	0,84	0,17	0,86	0,57	0,58	0,62	1		
Is Anhydrite	0,81	0,75	0,73	0,38	0,29	0,65	0,84	0,17	0,86	0,57	0,58	0,62	1,00	1	
pH	0,17	0,19	0,16	0,16	0,11	0,15	0,18	0,01	0,18	0,38	0,38	0,40	0,25	0,25	1

Cette matrice permet d'apercevoir les éléments corrélables entre eux, suivant la valeur du coefficient de corrélation la bonne corrélation sera avec $r = 0,8$, ce qui nous permet d'extraire dans le tableau 57 les couples suivants :

Tableau 57 : éléments chimiques les bien corrélables

Cond - Ca	0,80	Is Anhydrite - Cond	0,86
Is Anhydrite - Ca	0,81	Is Gypse - Cond	0,86
Is Gypse - Ca	0,81	Cond - SO₄	0,89
Na - Mg	0,82	Cond - Mg	0,89
Na - Cl	0,83	Cond - Na	0,90
Cond - Cl	0,83	Is Dolomite - Is Calcite	0,96
Is Gypse - SO₄	0,84	Is Dolomite - Is Aragonite	0,96
Is Anhydrite - SO₄	0,84		

L'examen du tableau 56 relatif à la matrice de corrélation permet de voir qu'il existe une forte corrélation entre la conductivité d'une part et le sodium, calcium, magnésium, les chlorures et les sulfates d'autre part. C'est une corrélation qui fait ressortir déjà l'influence des roches évaporitiques.

La corrélation très significative entre les deux indices de saturation (de gypse et de l'anhydrite) avec la conductivité renforce l'hypothèse de la dissolution de ces évaporites. Cependant, les indices de saturations de la calcite et de l'aragonite et de la dolomite avec la conductivité montrent de moindres corrélations que les autres, ce qui affirme la précipitation de ces minéraux carbonatés (figure 96).

Les sulfates et les bicarbonates qui présentent 56% de la minéralisation totale ont un coefficient de corrélation très faible $r = 0,17$ ce qui indique qu'ils sont issus de formations distinctes.

Le couple $\text{SO}_4 - \text{Ca}$ est inclus dans les faciès chimiques existants dans la région (Sulfaté calcique) ces deux éléments sont corrélés avec un coefficient de 0,77 ; l'origine de ce dernier provient des formations évaporitiques de Trias et de l'Aptien.

Le couple $\text{Na} - \text{Cl}$ présente un coefficient de corrélation bonne ce qui indique que ces deux éléments ont la même origine en l'occurrence la dissolution de la halite.

La corrélation des deux couples $(\text{Na}-\text{Ca})$ et $(\text{Na}-\text{Mg})$ traduit l'échange ionique de base entre les alcalins et les alcalino-terreux de l'eau-roche encaissante.

On remarque aussi que les nitrates ne présentent aucune corrélation avec les autres éléments, ils sont la conséquence de la contamination anthropique des eaux.

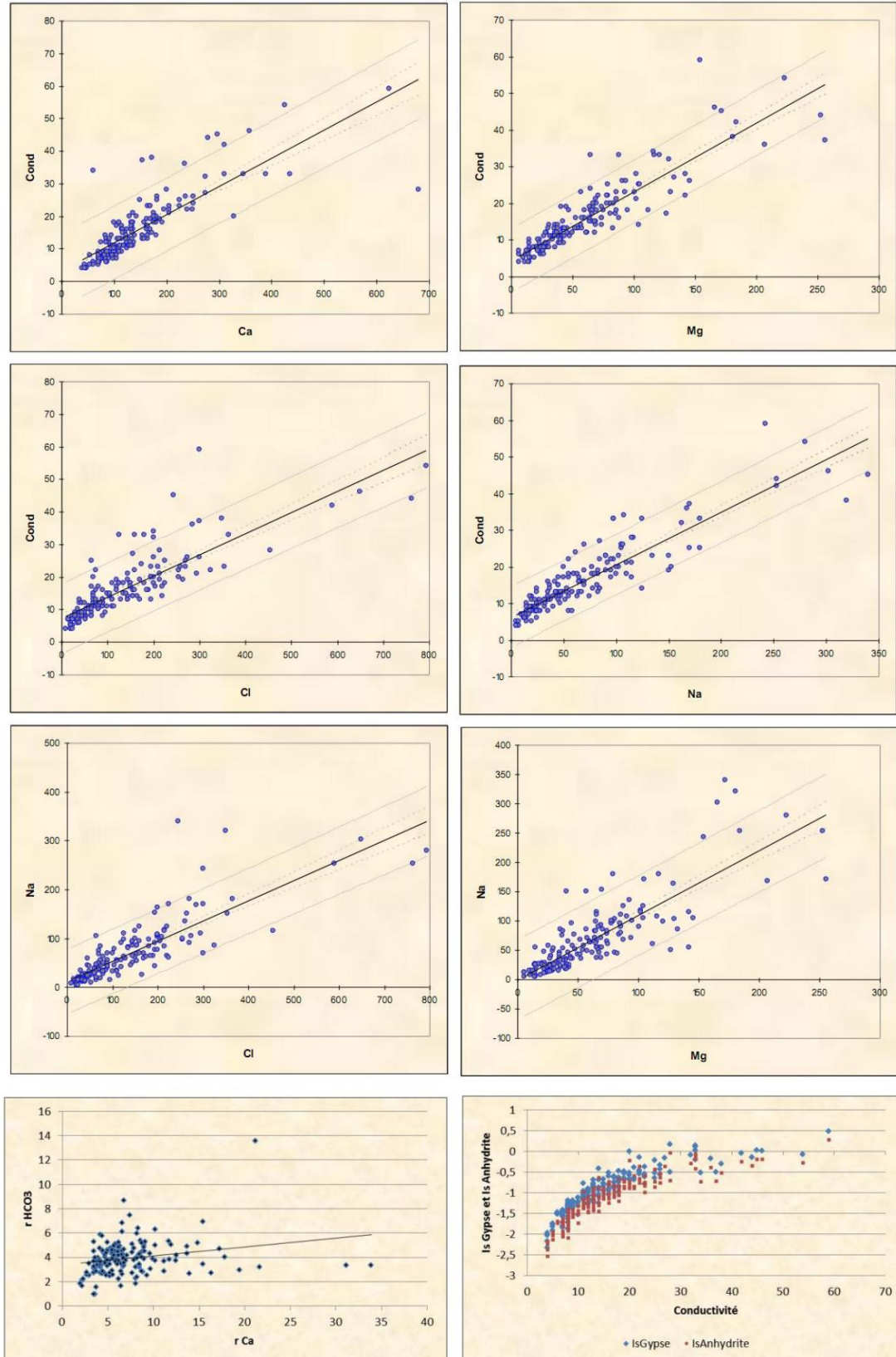


Figure 96 : Éléments chimiques les bien corrélés

5.3.2 L'analyse des plans factoriels :

Le traitement a été poussé jusqu'à quatre facteurs, à ce stade seulement 76,03% de la variance ont été exprimés.

Le facteur 1 représente 55,64 % de la variance et il est déterminé par les éléments chimiques Ca, Mg, Na, Cl, SO_4^{2-} , Cond, Is Gypse et Is Anhydrite.

Le facteur 2 représente 13,00 % de la variance et il est déterminé par Is Calcite, Is Aragonite, Is Dolomite et à moindre degré par les bicarbonates (HCO_3^-).

Le facteur 3 représente 7,37 % de la variance est déterminé les nitrates (NO_3^-) et le pH.

Tableau 58 : Pourcentage de variance exprimée

Variabes	F1	F2	F3
Ca	8,032	1,617	1,532
Mg	9,005	2,195	4,215
Na	8,831	3,558	1,105
K	2,502	1,826	12,795
HCO3	2,685	7,370	9,212
Cl	7,624	2,392	3,737
SO4	8,053	9,174	2,081
NO3	0,882	0,462	39,571
Cond	10,638	3,816	0,686
Is Calcite	6,522	20,407	0,198
Is Aragonite	6,540	20,334	0,196
Is Dolomite	7,514	16,564	0,006
Is Gypse	9,956	1,363	1,479
Is Anhydrite	9,956	1,363	1,472
pH	1,259	7,557	21,714

5.3.3 Analyse de l'espace des variables et des individus :

Dans l'espace des variables, on peut considérer le facteur F1 comme facteur de minéralisation liée aux évaporites.

Le second facteur F2 est considéré comme facteur de minéralisation liée aux bicarbonates.

Le troisième facteur F3 est considéré comme facteur de pollution.

L'analyse en ACP, a permis de distinguer :

- ❖ Un groupe de points (77, 138,103,98,9,99,128,146,155,167,215,133,52,42 et 63) présentent une forte minéralisation caractérisée par les teneurs élevées en Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl et Mg^{2+} . Ces points sont situés dans les dépressions piézométriques.
- ❖ Un groupe de points ayant une teneur élevée en HCO_3^- et parmi eux on peut citer les suivants : 71, 138,124, 137, 133, 107, 44,157 et 139 qui doivent leur caractère à la matrice calcaire des grés du Barrémien-Aptien-Albien.
- ❖ Un dernier groupe de points d'eau pollués où Les points 81, 87, 94, 146 et 79 ce sont des points des rejets résiduaire et les points 154 et 157 qui doivent sa teneur élevée en NO_3^- à l'utilisation d'engrais.

Les figures 99 et 100 permettent de visualiser la projection des variables et des individus selon le plan F1 – F3.

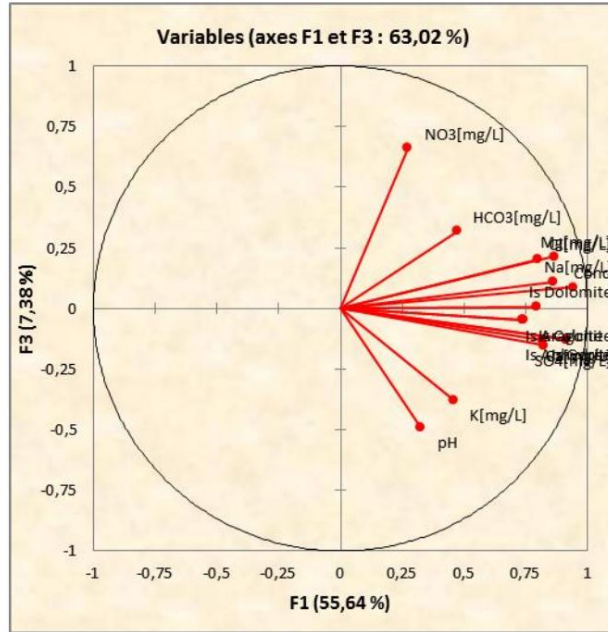


Figure 99 : Projection des variables selon le plan F1-F3

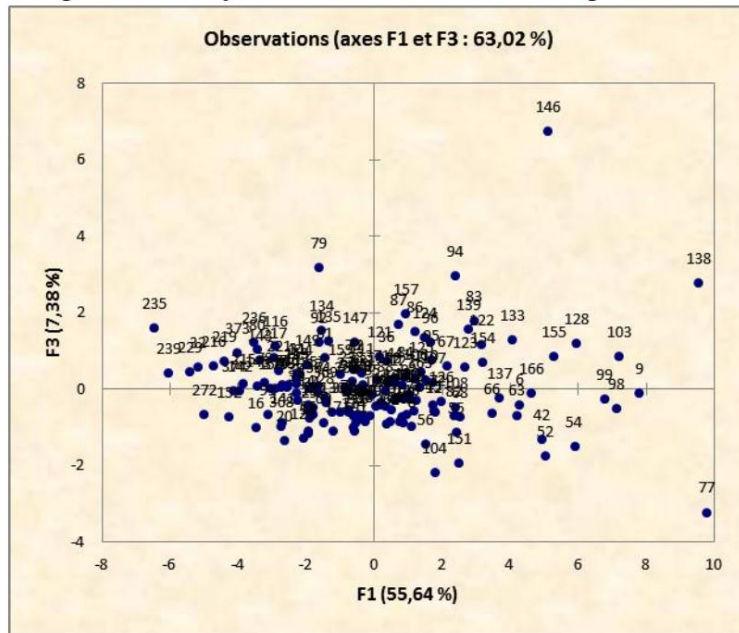


Figure 100 : Projection des individus selon le plan F1-F3

Les figures 101 et 102 permettent de visualiser la projection des variables et des individus selon le plan F2 – F3.

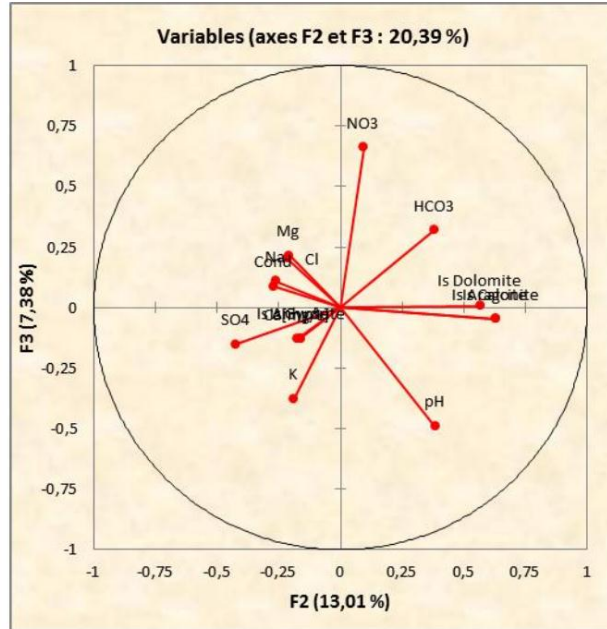


Figure 101 : Projection des variables selon le plan F2-F3

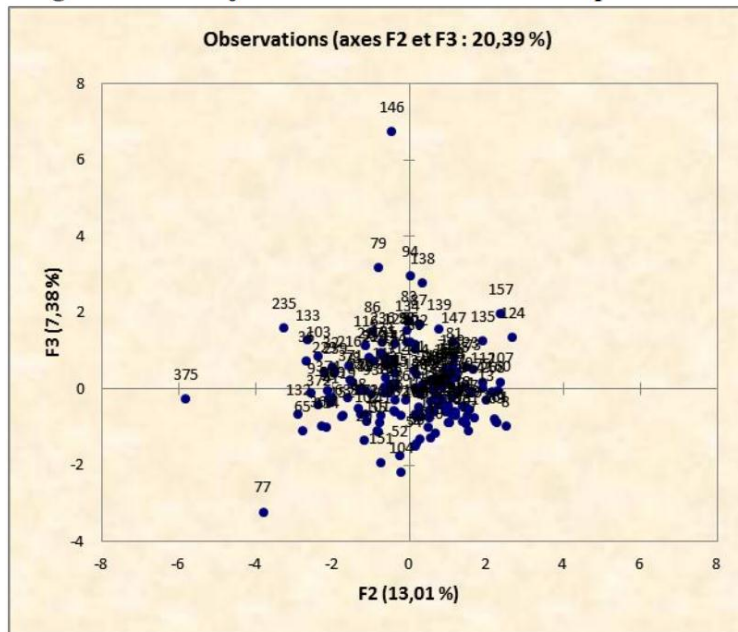


Figure 102 : Projection des individus selon le plan F2-F3

V Effet de la pollution sur la qualité chimique des eaux :

La position du milieu urbain dans la plus importante dépression du Djebel Amour et l'existence de l'Oued Medssous qui irrigue ses terres fertiles ont dictés le choix de l'emplacement de la ville d'Aflou en 1856.

Aflou dépendait de la wilaya de Tiaret, fut rattachée à la wilaya de Laghouat suite au redécoupage des territoires des wilayas de Tiaret et Ouargla créant la wilaya de Laghouat 1975.

La commune d'Aflou occupe une superficie de 405 Km² avec une population de 102 025 habitants (recensement de 2008).

Les chaines montagneuses qui ceinturent la ville du côté Nord et Sud et les terres agricoles ont guidé l'extension de la ville vers l'Ouest.

1. Alimentation en eau potable :

La commune d'Aflou dispose treize forages opérationnels pour satisfaire les besoins en eau potables de la population, les coordonnées de onze forages sont mentionnés dans le tableau suivant.

Tableau 59 : les forages d'alimentation en eau potable

Localisation	N° du forage	X	Y	Z	Année de mise en service	Population en hab.	Débit en m3 /h
Daïet Lagrad	F1	445	390,9	1407	1965	10000	150
El Graba	F2	444,3	390,4	1407	1976	5500	300
Cité Med Boudhiaf	F3	-----	-----	-----	1977	5000	300
Boukhrouf	F5	445,1	389,8	1407	1985	5000	220
Ain Kherarcha	F6	444,3	389,7	1407	1986	5000	180
Cité 1037 logts	F8	444	390,5	1407	1989	6000	180
Cité Med Boudhiaf	F9	445,2	390,5	1407	1990	3000	180
Oum Grine	F10	438,6	390,5	1407	1991	6000	180
Zahi Ben Aissa	F11	445,9	389,4	1407	1993	4000	220
Abattoir	F12	444	390,7	1407	1997	4000	220
Ras El ain	F13	444	390,5	1407	1999	6000	220

2. Principales sources de pollution dans la région d'étude:

Vu la forte activité urbaine et agricole qui se développe dans la zone d'étude, plusieurs apports de contaminations ont été détectés : l'une d'origine anthropique due aux rejets direct d'eaux usées et à l'utilisation des produits chimiques dans l'agriculture. L'autre à une origine naturelle, c'est essentiellement l'effet des évaporites. L'ensemble de ces apports induisent une

pollution chimique ou provoquent l'augmentation de la concentration des éléments chimiques dans les eaux souterraines. Cela conduit à une dégradation de leur qualité.

2.1 Rejets d'eaux usées : deux types sont distingués :

- a) **Urbains :** ils sont liés aux rejets des agglomérations par les réseaux d'assainissement. Ces apports sont caractérisés par de fortes teneurs en ammonium et en phosphate. Une analyse chimique a été réalisée sur les rejets de l'agglomération de la ville d'Aflou, qui rejette directement sur les effluents dans l'oued Medssous qui est composé essentiellement de sables argileux qui surmontent parfois les grés fissurés du Continental Intercalaire. Le volume d'eau rejetée est estimé 6598 m³/jour en 2010.

Plusieurs analyses ont été réalisées sur des échantillons représentatifs au niveau de l'exutoire (conduite déversant dans l'oued Medssous). Les résultats obtenus par la société des techniques hydrauliques et routières STHYR sont représentés dans le tableau 60.

Tableau 60 : Analyse physico-chimique de l'eau du rejet urbain

Rejet urbain	T de l'eau brute	pH	Cond	Min	MES	DBO ₅	DCO	NH ₄	PO ₄	DCO/DBO
Unité	°C	---	µS/cm	Mg/l	Mg/l	Mg/l O ₂	Mg/l O ₂	Mg/l	Mg/l	---
29/08/2006	22	7,19	1386	1051	361	165	497	83,48	3,38	3,19
06/09/2006	20	7,20	1246	944	314,2	150	403,2	44,78	1,80	2,69

Ces analyses montrent une eau riche principalement en deux éléments chimiques : l'ammonium (44,78 à 83,48 mg/l), lié principalement aux déchets humains (urines), et le phosphate (des enquêtes ont permis d'évaluer de 2 à 5 grammes rejetée par habitant et par jour) qui est essentiellement dû à l'utilisation des produits détergents.

La demande biochimique en oxygène (DBO₅) d'une eau usée domestique est généralement inférieure à sa demande chimique en oxygène (DCO), cela a été confirmé dans les prélèvements analysés.

Le rapport moyen de la DCO/ DBO₅ varie entre 2,69 et 3,19 qui sont considérées légèrement élevées, cela peut être expliqué par la présence de matières organiques difficilement biodégradables.

Les conséquences de ce rejet sur la qualité des eaux de l'oued Medssous est de donner un caractère réduit à l'eau et de favoriser l'apparition des éléments polluants.

- b) **Industriel :** le secteur industriel est pratiquement inexistant, mais dans ce contexte il faut signaler la pollution par les hydrocarbures qui sont produits à partir des dérivés liquides du pétrole : benzine, essence huiles ...

Les rejets sont essentiellement des huiles parfois injectés directement dans le réseau d'assainissement d'une moyenne de 360 l/jour.

2.2 L'agriculture :

Les terres agricoles se localisent au cœur de la dépression d'Aflou en se situant de part et d'autre de l'Oued Medssous en particulier au niveau d'El-Haoudh.

D'une surface de 600 Ha, ces terres dépendent de plusieurs forages et puits (plus de 150) avec un débit d'exploitation estimé à 700 l/s surtout pendant la période estivale. Ces points d'eau se localisent essentiellement le long de l'axe de la cuvette d'Aflou.

Dans ce contexte, il existe plusieurs types de cultures surtout à partir de 1998 :

- cultures fourragères : 100 Ha
- cultures céréalières : 300 Ha
- cultures maraichères : 200 Ha

Dans le contexte agricole, Les véritables sources de pollution sont liées :

- au traitement des sols et des végétaux par les produits phytosanitaires

Les herbicides : rarement utilisés pour les désherbages des céréales

Les pesticides : utilisés pour la destruction des micro-organismes nuisibles du sol.

Les fongicides : utilisés pour les cultures maraichères (fréquemment utilisés à partir de l'an 2000 surtout pour la pomme de terre).

- à l'utilisation des engrais chimiques pour les différences cultures

Les quantités d'engrais injectées selon les services de la DDA d'Aflou sont les suivantes :

Tableau 61 : Engrais utilisés

Type d'engrais	q/Ha	Quantité q
Engrais composés	10	2000
Engrais azotés	2	3700
Engrais organiques	40	4000

2.3 l'élevage :

l'élevage est l'une des ressources de nuisance de l'environnement par les dégagements d'odeur et les risques de contaminations superficielles et souterraines des eaux liées à l'augmentation des concentrations en nitrates et phosphates. Le tableau suivant résume les élevages existants au niveau de notre secteur d'étude :

Tableau 62 : Types d'élevage dans la commune d'Aflou

Type d'élevage	Nombre
bovin	200-300
Ovins	2000-2500
Poulets de chair	18000-22000

Les poulets de chair dont les déchets sont riches en azote, phosphate et potassium. Les déchets produits par une poule sont estimés à 180 g/jour soit 65Kg/an donc 1300 tonnes /an.

À noter que les bovins se concentrent essentiellement à El-Haoudh (à l'ouest d'Aflou), les poulaillers au Sud-Est, tandis que les ovins on peut les retrouver dans toute la région d'étude.

2.4 Les décharges :

Aflou possède une décharge contrôlée mais parfois on trouve des décharges sauvages implantées ay grés de leur utilisation.

Cette décharge contrôlée se situe à 15 km d'Aflou d'une superficie d'environ 20 hectares se déposant sur les grès fissurés du Barrémien. Elle reçoit des déchets très variés mais la quantité organique tient une part importante de 70 à 80 %.

La disposition de la décharge sur les grès représente un danger sur la qualité des eaux.

2.5 Cimetières :

Aflou est doté de trois cimetières musulmans reposés sur les grès fissurés à dragées de quartz et deux autres à confection chrétienne et juive (citées pour la simple information) se trouvent juste à l'Est d'un décrochement très important : Chabet M'Lila qui constitue un drain pour les eaux souterraines.

L'emplacement des cimetières sur une formation aquifère entraîne une contamination des puits et permet le véhicule de la matière organique vers la nappe.

2.6 Les apports naturels :

Ils jouent un rôle principal dans l'acquisition des éléments chimiques par les eaux, par la dissolution des formations géologiques. Le danger de ce processus apparaît lorsque les concentrations de ces éléments dépassent les limites de potabilité.

Dans le synclinal d'Aflou l'origine responsable de l'augmentation de la concentration des éléments chimiques est celui de la dissolution des formations évaporitiques.

L'existence des formations gypseuses et salifères favorise une dissolution rapide des éléments évaporitiques Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et SO_4^{2-} ces derniers ont produit une augmentation importante de la salinité des eaux.

La Daïa El Malha située au Sud-Est par rapport à Aflou, est une zone stérile en matière d'agriculture suite à la qualité de ses eaux souterraines salées. Il s'agit donc un impact environnemental d'ordre naturel.

3 Degré de pollution dans les formations aquifères du synclinal d'Aflou:

3.1 Domaine principal de réception de pollution :

Les nappes alluviales sablo-argileuse se localisent juste au niveau du drain principal de l'oued Medssous où le niveau statique ne dépasse pas les deux mètres parfois dans l'Oued Rehamna, Ain Mansour et auparavant à El Haoudh.

Sans une protection contre les risques de pollution, cet aquifère est en communication directe avec les eaux usées déversées dans l'Oued.

Vu leur porosité 50% et la vitesse d'infiltration variante entre 0,1 à 0,5 m/jour, l'eau percole rapidement ce qui permet le passage rapide des polluants organiques (déversement du réseau d'égout) et chimiques (dissolution des éléments chimiques).

3.2 Terrains dans lesquels la pollution se propage rapidement :

Il s'agit des calcaires fissurés du Portlandien (Néocomien) et du Turonien et les grès fissurés du Continental Intercalaire. L'écoulement de l'eau dans ces terrains est en général bien filtré lorsque la densité de fissuration est faible.

Au niveau de la dépression d'Aflou, la circulation des eaux souterraines dans les grès à double perméabilité (fissure et interstice) se fait principalement dans les fissures de direction $\text{N}60^\circ$ et $\text{N}140^\circ$.

C'est au niveau de ces grès que la pollution par les cimetières et ordures ménagères est très importante.

3.3 Terrains dans lesquels la pollution se propage de façon faible ou nulle :

Il s'agit d'argiles rouges du Tertiaire et celles intercalées dans les grès du Barrémien-Albien et les marnes vertes du Portlandien inférieur et du Cénomaniens.

La carte 103 résume les différentes origines de pollution signalée précédemment et leurs propagations dans la région d'étude.

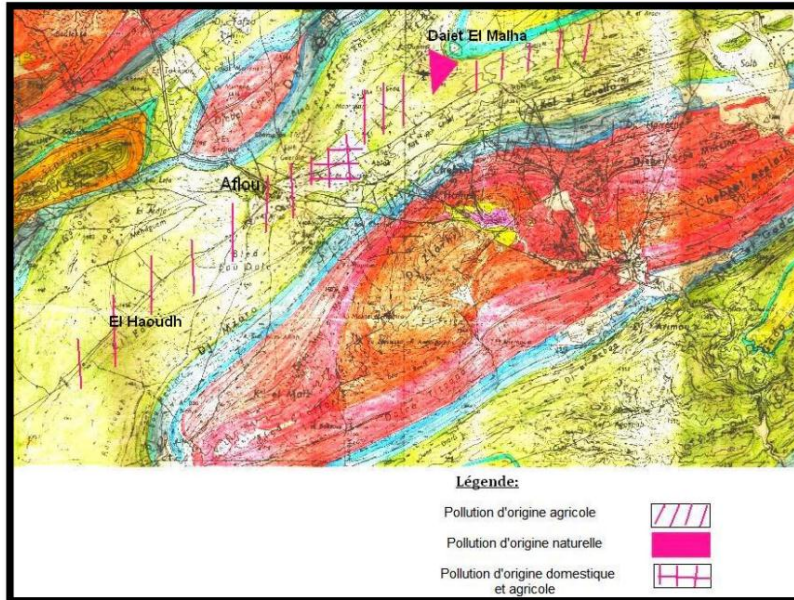


Figure 103 : carte de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines (in DJAFRI,al 2007)

Conclusion :

L'étude hydrogéochimique des eaux de la nappe du Barrémien-Aptien-Albien du synclinal d'Aflou permet de dire que :

- Les eaux présentent quatre faciès dominants, qui sont le sulfaté calcique, bicarbonaté calcique ; sulfaté magnésien et chloruré calcique.
- La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations gypseuses.
- L'évolution des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales, a montré la dominance des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité.
- Le calcul de l'indice de saturation des minéraux carbonatés et gypsifères a montré que les premiers ont tendance précipiter avant les seconds, ceci a permis aux éléments chimiques provenant de la dissolution des gypses d'acquérir des teneurs importantes.
- L'analyse en composante principale a confirmé que certains forages présentent des teneurs très élevées en SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} et Na^+ . Comme elle permet de détecter des sites pollués dans la région d'étude.
- La classification de Richards et celle de Wilcox ont prouvé d'aptitude des eaux à l'irrigation.

Conclusion générale

La présente étude qui a porté sur le synclinal d'Aflou a abouti aux conclusions suivantes :

- ❖ *Les monts du Djebel Amour représentent la partie centrale de l'Atlas Saharien limitée au Nord par l'accident Nord-atlasique et au Sud par la flexure Sud-atlasique. La structure tectonique de la région étudiée est marquée par un vaste synclinal à fond sub- horizontal de direction NE-SW, étroit au Nord-Est et devenant de plus en plus large vers le Sud-Ouest. Les formations gréseuses qui forment le synclinal sont très fissurées.*

Ce synclinal est limité au Nord et au Sud, respectivement, par Djebel Chebka et Djebel Zlagh qui sont des anticlinaux de style coffré aux failles très fracturées.

Les termes de la série stratigraphique du secteur comprennent :

Le Jurassique supérieur comporte un ensemble lithologique à dominance marine qui repose sur une série à dépôts continentaux.

Le Crétacé débute par une puissante série gréseuse, correspondant à une sédimentation continentale (stratification entrecroisée) et se termine par une formation marine qui constitue des marnes et des calcaires du Cénomanién Turonien.

- ❖ *La région d'Aflou est soumise à un climat semi-aride, le total pluviométrique annuel enregistré est de 275,17 mm repartit de façon hétérogène.*

La pluviométrie maximale observée durant la période (1990-2011) est de 33,01 mm enregistrée pendant le mois de Janvier, or que le mois le plus sec est représenté par le mois de Juillet avec 11,89 mm. Il est à signaler que la saison hivernale est relativement la plus pluvieuse avec 32,6 % du cumul annuel.

La température moyenne atteint 24,75 °C le mois d'Aout. Par contre au mois de Janvier la température moyenne atteint 3,9°C.

La sécheresse, selon le diagramme ombrothermique de Gaussen, s'étend du mois d'Avril jusqu'à mi-Novembre.

L'évapotranspiration réelle est de l'ordre de 273,82 mm soit 94,70% des précipitations favorisant un déficit d'écoulement très marqué avoisinant les 4,27 % des précipitations ce qui entraîne une infiltration très faible avec 1,02 % des précipitations pour la période allant de 1990 au 2011.

Faisant la comparaison entre les stations climatiques, on remarque que la station d'Aflou présente une pluviométrie considérable et une température modérée par rapport aux autres stations, cela est commandé par trois facteurs :

La situation géographique (distante de 270 Km de la mer) la région ne reçoit que les influences méditerranéennes très estompées tandis que s'affirment les influences sahariennes.

L'altitude (région de montagne) elle se retrouve à 1406 m.

L'orientation des versants (directement exposés aux vents pluvieux).

- ❖ *Du point de vue hydrogéologique, la zone étudiée abrite un aquifère principal et important est celui du complexe gréseux de Barrémien-Aptien-Albien. Il s'agit d'un aquifère à perméabilité mixte où la fissuration joue un rôle primordial dans la circulation des eaux souterraines.
Les pompages d'essai réalisés dans confirment que c'est un milieu transmissif.
La cartographie piézométrique a montré que l'écoulement souterrain assez complexe avec des variations du niveau piézométrique.*
- ❖ *Les sondages électriques effectués dans la région, ont permis de mettre en évidence la structure de la cuvette d'Aflou, correspondant à un synclinal arrondi légèrement déversé vers le Sud-est et existence d'un axe très transmissif qui peut correspondre à un axe de drainage des eaux de l'aquifère.*
- ❖ *L'étude hydrochimique montre que les eaux présentent quatre facies dominants, et que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe avec dominance des ions gypsifères par rapport à ceux carbonatés.
L'analyse en composante principale a mis en évidence l'influence des minéraux évaporitiques sur la minéralisation des eaux souterraines de l'aquifère de Barrémien-Aptien-Albien et une pollution anthropiques.
Il est à signaler que le problème de pollution se pose dans la région et plus précisément au niveau de l'oued Medsous. Un projet, en cours, de la réalisation d'une station d'épuration est programmé dans le but de la protection de la qualité des eaux de l'Oued Medsous contre l'apport des eaux usées provenant de la ville d'Aflou et la protection de la population contre les maladies à transmission hydrique. Cette future station a pour une Capacité de 92 000 EH soit un débit de 10 365 m³/j à l'horizon 2020. Les eaux épurées de cette future station seront réutilisées à des fins agricoles.*

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- ❖ **Abed S. (1982)** *litho-stratigraphie et sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du Dj. Amour (Atlas Saharien).Thèse 3eme cycle université de Pau, France*
- ❖ **Achour F. Guedjtal A. Abdelgader A. Thiebaud C. et Mania J. (1995):**
Régionalisation de la pluviométrie dans le bassin versant du Cheliff (Algérie) par modèles linéaires. Séminaire National des sciences de la Terre, Alger, mars 1995
- ❖ **Achour F. (1997) :** *Condition hydrologiques et disponibilité en eau en région semi-aride: Application de méthodologies nouvelles au bassin du Cheliff, Algérie. Mémoire D'ingénieur d'état. Université des Sciences et Technologie d'Alger*
- ❖ **Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH)** *Données climatiques et hydrologiques*
- ❖ **Bettahar A. (2009)** *Les accidents majeurs de l'atlas saharien central et les structures associées ; thèse de doctorat d'état USTHB. Alger*
- ❖ **Benzedhoua M.et Bouterbiat M. (2011)** *Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique de la plaine d'El Haoudh (cuvette centrale de la région d'Aflou) .Mémoire d'Ingénieur d'État, univ. d'Oran*
- ❖ **Boulahouat N.(1993)** *Étude méthodologique sur la Télédétection des sols en milieu aride, région de Djelfa, Algérie. I.N.R.A, Laboratoire de Télédétection, Montpellier, France, 24p.*
- ❖ **Chenafi A.(2013)** *Cartographie et protection qualitative des eaux souterraines en zone aride, cas de Milok -Metlili, Atlas Saharien central,Univ .d'Oran*
- ❖ **Castany G. (1998)** *Principe et méthode de l'hydrogéologie*
- ❖ **Coutagne A et De Martonne (1958)** *Évaporation et déficit d'écoulement .ass. Int .Hydrologie*

- ❖ **Chalouan et al. (2008)** *The Rif Belt, In : A. Michard et al. (Ed.), Continental Evolution: The Geology of Morocco. Lecture Notes in Earth Sciences*
- ❖ **D.D.A** : *Données des engrais utilisés*
- ❖ **Djafri F. et Selmane T. (2007)** *pollution des eaux souterraines au niveau de la commune d'Aflou .Mémoire d'Ingénieur d'État,univ.de Laghouat*
- ❖ **E.N.A.G.E.O (1986)** *Étude géophysique et hydrogéologique du synclinal d'Aflou*
- ❖ **E.N.A.G.E.O (1988)** *Étude géophysique et hydrogéologique du synclinal d'Aflou*
- ❖ **Hanachi A. (1981)** *Hydrogéologie de la vallée de l'oued M'zi à l'Est de Laghouat, uni.de Grenoble Thèse de Doctorat*
- ❖ **Halitim A. (1985)** *Contribution à l'étude des sols des zones arides des Hautes Plaines steppiques de l'Algérie. Morphologie, distribution et rôle des sols dans la genèse et le comportement des sols. Thèse Doctorat d'État, Univ. Rennes, 183p.*
- ❖ **Kazi-Tani N (1986)** *Évolution géodynamique de la bordure Nord-africaine : le domaine intra-plaque Nord-Algérie. Thèse Doctorat des Sciences,Univ .de Pau*
- ❖ **Laghouag M. Y.:** *Apport de la télédétection (image Landsat 7 ETM) pour la cartographie géologique de la région d'Aflou. Mémoire d'Ingénieur d'État, uni.de Sétif*
- ❖ **Mangin A. (1971)** *Étude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique*
- ❖ **Mangin A. (1974)** *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques .Ann.speleo*
- ❖ **Mangin A. 1984** *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrale. Journal of hydrology*
- ❖ **Mebarki A. (1984):** *Ressources en eau et aménagement en Algérie. Office des publications universitaires.*

- ❖ **Mehaiguene M.** *Bilan hydrologique et ressources en eau de surface du bassin Chellif-Zahrez ; Mémoire de Magister. École nationale supérieure d'Hydraulique Blida*
- ❖ **Mohamed Y.2011:***apport de la télédétection (images landsat 7 ETM+) pour la cartographie géologique de la région d'Aflou (atlas saharien) ingénieur d'état université FERHATT Abbas-Sétif*
- ❖ **Mansour H. (2007)** *hydrogéologie du continental intercalaire et du complexe terminal en domaine aride ; exemple des monts des ksour (atlas saharien occidental) thèse doctorat ; Uni d'Oran*
- ❖ **Mahboubi M. (1983)** *Étude géologique et paléontologique du crétacé post aptien et du tertiaire de la bordure méridionale du djebel amour atlas saharien central, Thèse 3eme cycle,I.S.T, univ ;d'Oran*
- ❖ **Nadji A. (1977)** *Étude sédimentologique, cartographique et néotectonique des formations post-turoniennes de l'Atlas saharien central .région d'Aflou (Laghouat) .Mém. de Magister, univ d'Oran*
- ❖ **Nouar O. (1992)** *Télédétection dans l'Atlas Saharien central, structure de réactivation dans le Djebel Amour d'après l'analyse d'images Landsat et SPOT, Mémoire de Magister, CNTS d'Arzew .p 17*
- ❖ **O.M.S** *Normes internationales pour l'eau de boisson*
- ❖ **Ritter E. (1902)** *Le Djebel Amour et les Monts des Oulad Nail .Mémoires et bulletins du Service de la carte géologique de l'Algérie*
- ❖ **Roche M. (1963)** *Hydrologie de surface*
- ❖ **Seltzer P. (1946)** *Le climat de l'Algérie, Université d'Alger*

- ❖ **Smati A. et Zebbar Z. (2011)** *Contribution de l'imagerie ALSAT-2A pour l'étude du réseau hydrographique ; zone d'Aflou (wilaya de Laghouat) publication in Agence Spatiale Algérienne*
- ❖ **Stamboul M. et Rouquet L. (1984)** *Résultats préliminaires sur l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Sebgag, Djebel Amour, Atlas Saharien central, Algérie.*

Caractérisation du bassin d'alimentation des sources de l'Oued Touil 4eme séminaire des sciences de la terre, Alger 5/6/7 Juin 1982.

- ❖ **Stamboul M. (1984)** *Essai d'analyse corrélatoires et spectrales des sources de Sebgag et comparaison avec les sources Aliou, Bajet et Fontestrobès, colloque international L'eau clé de développement du Maghreb, Oran Oct 1984.*
- ❖ **Stamboul M. (1986)** *Hydrologie de la haute vallée de l'Oued Sebgag, Séminaire des sciences de la terre, Alger Dec 1986.*
- ❖ **S.T.H.X.R** *Analyses chimiques des eaux du réseau d'égout d'Aflou*
- ❖ **Turc L. (1954)** *Le bilan d'eau des sols : relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*
- ❖ **Turc L. (1961)** *Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle*
- ❖ **Verdeil .P (1989)** *Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie.Sem .sci. Terre, Alger*
- ❖ **WEC Algérie (2007)** *Petroleum of Algeria .Algeria Well Evaluation Coference*

Annexes

Annexe I : Calcul de khi deux

Station de Seklafa	Classe1 [100,71-144,14]	Classe2 [144,15-187,58]	Classe3 [187,59-231,02]	Classe4 [213,03-274,45]	Classe5 [274,46-317,89]	Somme
Effectif observé	7	4	5	5	1	22
Effectif théorique	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	-----
$\frac{ni - npi}{npi}$	1,53	0,036	0,08	0,08	2,62	4,34
X ² théorique						5,96

Station de S. Bouzid	Classe1 [11,50-107,32]	Classe2 [107,33-203,15]	Classe3 [203,16-298,98]	Classe4 [298,99-394,81]	Classe5 [394,82-490,64]	Somme
Effectif observé	7	4	5	4	2	22
Effectif théorique	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	-----
$\frac{ni - npi}{npi}$	1,53	0,036	0,08	0,036	1,30	2,98
X ² théorique						5,96

Station d'oued Morra	Classe1 [76,82-92,33]	Classe2 [92,34-107,85]	Classe3 [107,86-123,37]	Classe4 [123,38-138,89]	Classe5 [138,90-154,41]	Somme
Effectif observé	7	3	6	4	2	22
Effectif théorique	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	-----
$\frac{ni - npi}{npi}$	1,53	0,44	0,58	0,036	1,30	3,88
X ² théorique						5,96

Station de Brida	Classe1 [98,98-119,79]	Classe2 [119,80-140,61]	Classe3 [140,62-161,43]	Classe4 [161,44-182,25]	Classe5 [182,25-203,06]	Somme
Effectif observé	7	4	6	3	2	22
Effectif théorique	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	-----
$\frac{ni - npi}{npi}$	1,53	0,036	0,58	0,44	1,30	3,88
X ² théorique						5,96

Station de Sebgag	Classe1 [83,62-108,15]	Classe2 [108,16-132,69]	Classe3 [132,70-157,23]	Classe4 [157,24-181,77]	Classe5 [181,78-206,31]	Somme
Effectif observé	6	5	4	2	5	22
Effectif théorique	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	-----
$\frac{ni - npi}{npi}$	0,58	0,08	0,036	1,30	0,08	2,07
X ² théorique						5,96

Station d'Aflou	Classe1 [159 - 214,92]	Classe2 [214,93-270,85]	Classe3 [270,86-326,78]	Classe4 [326,79-382,71]	Classe5 [382,72-438,64]	Somme
Effectif observé	6	4	6	4	2	22
Effectif théorique	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	-----
$\frac{ni - npi}{npi}$	0,58	0,036	0,58	0,036	1,30	2,53
X ² théorique						5,96

Annexe II : Niveaux piézométriques des points d'eau

Nom	X	Y	Niveau piézométrique
6	456,15	404,9	1386,63
7	456	403,85	1413
8	462,5	400,6	1415,97
9	462,1	403	1383,5
11	463,45	403,6	1350
12	461,975	401,75	1412,17
13	461,75	400,9	1417,84
14	469,075	401,775	1377,9
15	467,9	403,85	1328,15
16	467,8	404,2	1326,38
17	467,45	404,9	1310,38
18	467,45	405,1	1307,03
19	471	401,8	1326,32
20	471,25	401,75	1349,7
27	425,7	380,4	1324,78
28	426,25	381,275	1316
29	426,35	380,4	1335
30	426,225	380,3	1330
31	426,5	381,9	1318
32	428,45	380,875	1360
34	461,75	396,45	1337
35	461,5	396,3	1330,4
38	464	386,15	1295,68
39	464,15	386,2	1310
41	465,45	395,55	1286,8
42	465,5	395,75	1293,69
44	461,6	397	1356,35
45	464,75	395,45	1290,82
52	465,35	395,85	1299,42
53	465	396,55	1304,2
54	465,75	395,7	1291,68
55	465,25	396,25	1304,91
56	465	396,075	1305,37
57	464,325	396,45	1313,4
63	459,5	398,3	1410
65	458,9	398,05	1413,5
66	460,05	398,55	1407
67	457,7	397,625	1420,96
68	454,35	396,5	1412,37
69	454,45	396,6	1412,42
71	452,45	395,65	1411,46
72	452,3	397,55	1436,12
73	452,3	398	1433,84
75	451,7	396,3	1414,64

77	451,6	396,15	1416,45
78	449,3	392,9	1484,89
79	448,4	392,8	1469,3
80	448,15	392,425	1427,5
81	447,75	392,25	1474,8
82	447,5	392,45	1478,63
84	447,275	392,35	1387,35
87	447,2	392,3	1386,5
89	447,1	392,25	1388,5
93	447,025	391,9	1384,5
94	447,35	392,85	1375,6
97	447,9	393,15	1367
102	447,875	393,35	1375,98
105	447,825	393,5	1376,43
109	448,15	394,05	1379
110	448,175	394,125	1376,68
112	448,95	396,2	1363,64
113	449,075	396,425	1364,87
114	448,25	393,9	1374,5
116	448,4	395,95	1371,63
118	449,7	395,625	1378
120	446,2	391,75	1420
121	446,775	391,625	1389
122	447,15	391,275	1384,9
124	447,375	391,5	1380,8
125	447,5	391,5	1386,8
126	446,075	390,575	1387,28
128	445,9	390,5	1386,7
129	446,525	390,1	1425,5
132	452,85	392,7	1384,93
133	445,35	390,45	1395
135	445,75	390,3	1402,37
138	445,15	390,2	1406,8
140	445,4	390,1	1414,6
141	444,75	389,6	1122
142	444,175	389,625	1394
143	444,1	390,4	1305
145	446	390,8	1100
148	440,1	386,075	1333
149	436,6	382,925	1439,27
150	435,7	382,1	1444,92
152	437,7	384,075	1428,58
153	437,95	384,3	1415,08
154	439,5	385,95	1424,26
155	439,25	386,125	1422,71
156	441	387,1	1403,35

157	441,55	386,85	1415,11
158	441,825	387,3	1416,83
159	441,85	383,35	1514,28
161	441,45	387,2	1413,5
162	441,3	387,35	1405,87
166	440,85	393,3	1406
167	441,1	392,1	1356,95
215	425,95	379,55	1342
216	426,45	378,25	1352
217	426,95	372,5	1390,36
219	416,325	367,85	1374,75
221	412,4	372,85	1400
229	433,35	379,05	1318,93
235	416,2	377,25	1374
236	416,2	377,2	1392
237	416,75	375,75	1391,86
238	420	374,15	1406,96
246	422,65	368,6	1405
268	409	360,6	1380
272	432,625	371,75	1420,5
360	405,4	359,7	1370,99
364	446,05	390,05	1418,54
366	441,15	387	1413,36
368	451,15	392,65	1358
369	454,15	393,4	1385
370	453,2	393,85	1400
371	454,55	393,55	1415
372	456,55	397	1420
373	455,45	397,6	1440
374	459,85	396,4	1355
375	460,8	394,75	1322

Annexe III Teneurs en mg/l

Nom	pH	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	Cond	RS	Min
6	7,9	275	133	85	8	300	155	845	79	27	1714	1693
7	7,5	83	27	25	5	231	35	108	9	8	504	465
8	8,2	83	74	78	11	290	105	248	65	14	970	868
9	8	280	253	253	19	164	763	1000	84	44	3027	2746
11	7,9	80	28	23	3	201	40	113	25	8	544	984
12	7,9	143	81	103	9	253	200	408	42	20	1260	1221
13	8,1	140	36	85	12	229	155	210	150	14	972	868
14	7,8	90	21	28	3	213	55	115	20	8	531	502
15	7,9	88	20	25	3	163	50	155	0	8	527	490
16	8	45	16	20	3	129	25	70	14	5	329	310
17	8	80	28	40	6	216	65	138	19	9	615	546
18	8	95	57	85	6	245	145	240	50	14	961	893
19	7,7	163	41	150	11	140	265	388	80	19	1307	1178
20	8	70	15	55	9	60	90	153	56	8	573	496
26	7,4	60	24	12	6	173	35	63	17	6	403	391
27	7,6	125	36	20	6	319	40	183	25	12	756	744
28	7,7	90	43	20	6	276	40	160	10	9	645	583
29	7,9	80	24	12	6	242	15	83	25	7	470	434
30	7,6	137	32	27	6	204	60	298	17	11	762	707
31	7,4	100	30	20	6	279	30	128	18	9	632	583
32	7,4	47	15	7	6	136	10	40	37	4	297	298
33	7,9	60	25	13	2	178	20	90	19	6	402	353
34	7,8	95	25	17	4	257	35	88	9	8	517	496
35	7,8	125	88	67	2	253	155	338	37	16	1077	1010
36	7,2	205	69	92	5	228	145	575	25	21	1411	1283
38	7,6	70	39	32	9	226	50	128	13	9	548	539
39	7,6	93	35	37	2	170	60	160	8	11	671	657
40	8	102	48	52	5	243	75	240	16	11	798	701
41	7,5	187	45	95	8	153	145	470	38	19	1154	1147
42	8	435	65	98	5	195	125	1112	97	33	2270	2046
43	7,7	80	29	15	6	229	65	50	33	8	534	496
44	7,6	168	66	37	2	391	70	330	3	15	1042	936
45	7,8	195	79	98	4	186	255	508	19	22	1384	1370
47	7,8	82	22	25	2	179	45	118	3	8	508	471
52	8	390	88	125	8	182	160	1150	60	33	2213	2046
53	7,8	112	44	38	4	239	60	210	12	11	717	701
54	7,9	680	102	117	5	205	215	820	54	28	1888	1705
55	7,8	225	104	105	6	176	65	845	27	25	1670	1544
56	7,9	170	67	90	8	196	120	538	14	19	1253	1172
57	7,6	98	34	32	3	267	65	155	7	11	655	651
58	7,8	125	29	48	8	297	75	180	6	12	756	744
63	7,6	275	129	163	12	264	200	1013	19	32	2194	1953
65	7,6	75	68	55	12	96	90	355	3	12	813	756

66	7,9	182	146	105	9	276	275	650	18	26	1611	1593
67	7,5	165	130	103	11	365	210	463	30	23	1458	1445
68	7,8	180	104	125	8	296	220	650	6	14	1589	1476
69	8	70	36	23	6	276	35	80	8	8	564	508
70	7,8	73	26	15	3	244	30	38	29	7	476	422
71	7,6	135	81	45	13	784	65	0	4	17	1195	1023
72	7,7	85	83	44	6	358	90	173	11	13	822	800
73	7,8	88	62	45	5	351	45	143	40	12	759	744
74	7,8	100	112	60	12	319	150	388	13	18	1154	1122
75	8	90	50	43	7	279	50	140	60	12	767	
76	7,8	85	61	63	5	210	80	233	49	12	829	744
77	7,8	625	154	242	28	204	300	2090	28	59	3737	3683
78	7,08	100	28	20	5	200	40	103	78	8	58,7	558
79	7,6	155	31	25	3	166	165	88	190	14	865	849
80	7,6	90	22	10	2	176	20	35	93	7	443	428
81	7,9	105	34	15	2	209	35	125	89	10	614	589
82	7,7	225	86	90	9	225	195	563	65	23	1458	1445
83	7,7	252	91	107	5	253	200	575	205	26	1681	1581
84	7,9	115	85	95	2	303	205	298	3	17	1113	1079
85	7,5	137	60	65	4	285	190	215	28	16	981	973
86	7,5	170	101	90	2	260	270	410	75	23	1408	1401
87	7,8	110	95	100	2	281	150	353	90	18	1197	1128
88	7,9	122	64	82	4	211	135	300	52	15	1040	930
89	7,6	105	66	115	4	165	150	363	70	17	1098	1054
90	7,8	112	55	58	7	156	130	238	53	13	825	806
91	7,5	55	26	58	7	170	45	133	17	8	514	514
92	7,7	85	37	75	2	221	70	155	79	12	746	725
93	7,8	130	70	153	7	176	195	460	45	20	1302	1240
94	7,6	237	94	70	5	235	300	350	300	26	1607	1581
95	7,7	170	93	135	4	203	260	500	69	23	1458	1432
96	7,9	137	102	115	2	215	215	480	110	21	1378	1327
97	8	115	53	35	5	255	75	343	48	16	999	980
98	7,8	298	172	340	9	315	245	1325	41	45	2847	2790
99	7,9	310	184	253	10	209	590	1100	16	42	2738	2604
100	7,7	158	65	83	5	230	180	355	18	18	1134	1085
101	7,8	125	42	65	10	135	145	288	15	13	884	806
102	7,6	178	74	83	5	171	215	470	6	19	1237	1190
103	7,8	358	166	302	5	246	650	1100	24	46	2890	2821
104	7,9	163	66	65	29	195	220	300	51	17	1106	1054
105	7,8	117	74	65	15	310	185	200	29	16	1008	980
106	7,7	178	64	70	6	274	170	313	85	19	1198	1166
107	8	133	64	70	11	418	160	248	41	16	980	973
108	7,7	250	71	85	10	228	325	333	88	22	1390	1364
109	7,9	118	35	45	8	240	90	170	12	11	706	694
110	7,6	180	84	77	2	307	195	417	57	20	1266	1265
111	7,9	115	54	50	2	244	145	185	25	13	833	824

112	7,9	123	69	37	2	295	70	268	65	14	920	849
113	7,7	165	43	25	4	247	40	308	70	13	902	825
114	7,5	162	58	70	4	114	90	500	6	16	1028	1011
115	7,4	125	15	27	2	226	80	138	21	10	653	639
116	7,4	85	40	18	2	195	45	135	64	9	535	527
117	8	83	15	15	7	200	40	68	21	7	444	440
118	7,7	138	41	18	4	232	75	220	36	12	776	750
119	7,9	165	66	55	4	239	120	405	33	17	1089	1042
120	7,7	82	24	20	15	223	65	58	28	8	564	508
121	7,4	180	47	77	3	238	200	290	100	18	1213	1097
122	7,9	183	79	180	10	321	270	492	77	25	1671	1538
123	7,9	205	78	95	4	306	160	500	120	22	1492	1370
124	7,7	137	86	80	2	528	135	200	68	18	1240	1128
125	8	133	66	110	5	277	125	358	70	18	1112	1097
126	7,8	175	86	110	6	245	295	328	50	21	1309	1296
127	7,9	135	75	60	2	257	225	268	25	18	1092	1085
128	8	173	181	320	3	328	350	1000	72	38	2467	2356
129	7,8	107	58	48	6	290	90	190	26	13	820	812
130	7,6	175	60	63	5	317	125	358	34	18	1124	1110
131	7,5	117	69	70	3	275	100	375	5	15	1019	949
132	7,4	130	46	58	9	101	170	265	3	13	819	781
133	7	310	117	180	17	424	365	670	95	33	2248	2071
134	7,6	125	28	40	2	293	90	133	2	12	721	713
135	7,9	100	41	25	3	280	55	65	92	10	643	626
136	7,7	110	23	28	10	261	60	98	59	10	734	620
137	7,9	150	105	170	18	455	225	450	18	25	1590	1544
138	7,4	425	223	280	4	827	795	790	14	54	3415	3348
139	7,8	205	57	150	13	385	355	228	98	23	1567	1414
141	7,5	70	31	18	7	188	25	175	14	8	511	496
142	7,4	87	6	12	3	167	40	70	1	6	384	372
143	7,7	70	26	13	2	165	35	75	37	7	416	409
144	7,6	87	40	22	4	218	50	108	63	9	564	552
145	7,6	85	12	15	2	165	35	70	27	6	424	384
146	7,8	155	256	170	5	312	300	700	485	37	2538	2319
147	7,8	92	52	67	4	265	70	165	140	13	871	818
148	7,6	193	70	55	2	262	110	495	2	18	1191	1110
149	7,8	105	18	27	2	231	40	80	64	8	568	496
150	7,7	98	6	12	2	154	20	70	73	7	450	428
151	7,8	328	67	50	7	165	70	950	0	20	1726	1240
152	7,7	73	14	25	2	60	35	78	16	6	407	384
153	8	105	13	10	1	151	53	70	72	7	453	446
154	7,7	200	142	115	3	237	455	500	86	28	1815	1736
155	7,8	235	207	168	5	326	285	1013	53	36	2344	2232
156	7,8	132	46	35	2	256	85	220	43	12	819	769
157	8	173	42	45	3	267	140	168	220	15	1070	949
158	7,7	135	44	35	3	199	110	250	43	13	821	775

159	7,8	118	40	35	2	222	80	155	62	11	710	694
160	8,1	112	39	20	2	244	65	158	48	11	672	663
161	8	123	52	43	3	271	90	255	35	13	915	806
162	7,7	135	68	45	3	243	105	320	53	15	979	924
166	7,7	347	121	98	7	288	180	1045	77	33	2360	2046
167	7,7	170	74	42	7	209	120	395	55	16	1076	1011
215	7,4	78	14	12	1	207	25	47	18	7	444	403
216	7,4	60	15	5	1	153	20	55	13	5	336	291
217	7,4	110	28	15	2	179	95	88	40	9	586	539
219	7,5	70	10	15	1	168	25	40	19	5	361	322
221	7,6	97	21	25	1	211	45	68	17	8	555	521
229	7,1	55	19	7	1	156	20	40	20	5	347	310
235	7,1	47	11	7	1	133	20	25	19	4	295	260
236	7,7	75	13	15	1	174	25	80	19	7	434	403
237	7,7	95	22	47	2	217	65	128	27	10	638	601
238	7,6	155	35	43	4	268	195	108	30	13	850	806
239	7,4	40	14	5	1	113	20	20	17	4	259	223
246	7,9	72	22	17	5	190	15	105	11	7	445	403
261	7,8	158	30	53	6	289	110	240	16	13	900	794
268	8,1	100	40	33	0	232	80	133	23	10	697	626
271	7,8	128	38	33	2	302	110	130	13	11	767	701
272	7,7	45	6	5	5	102	25	35	14	4	220	223
360	7,7	165	38	53	6	144	155	315	34	14	943	843
363	7,8	175	78	100	3	174	255	500	44	20	1272	1265
364	7,8	115	15	25	2	259	50	78	35	9	587	546
366	7,9	130	36	32	2	212	100	198	2	11	720	694
368		133	27	23	5	159	115	170	17	11	720	
369		110	38	83	6	291	75	380	23	13	966	
370		110	23	23	5	269	45	113	35	9	593	
371		133	127	50	6	373	80	513	19	17	1336	
372		240	142	55	6	308	75	975	27	22	1790	
373		70	27	35	1	321	30	38	35	8	496	
374		70	27	13	5	198	40	95	33	6	435	
375		60	116	108	6	214	200	1775	25	34	3114	

Annexe IV : Balance ionique

Nom	Balance	Σ Cations [meq/l]	Σ Anions [meq/l]
6	1%	28,569	28,157
7	3%	7,5788	7,1672
8	0%	13,905	13,928
9	0%	46,282	46,386
11	1%	7,3733	7,1793
12	-1%	18,511	18,961
13	-3%	13,953	14,918
14	-2%	7,5137	7,7598
15	1%	7,2012	7,3098
16	0%	4,5088	4,5037
17	-2%	8,1894	8,5542
18	-2%	13,282	13,91
19	-2%	18,314	19,138
20	-2%	7,3499	7,6118
26	2%	5,6444	5,4087
27	-2%	10,223	10,57
28	1%	9,0528	9,1448
29	1%	6,6424	6,5214
30	-3%	10,797	11,515
31	1%	8,4821	8,3743
32	1%	4,0376	3,9408
33	0%	5,6678	5,6625
34	3%	7,6395	7,1773
35	1%	16,444	16,153
36	0%	20,037	20,202
38	2%	8,3244	7,9894
39	7%	9,1814	7,9393
40	0%	11,429	11,354
41	1%	17,371	16,996
42	0%	31,446	31,44
43	0%	7,1843	7,1603
44	1%	15,475	15,302
45	-1%	20,596	21,125
47	2%	7,0408	6,7088
52	0%	32,344	32,409
53	4%	10,965	10,176
54	27%	47,543	27,369
55	4%	24,506	22,748
56	0%	18,116	18,025
57	-2%	9,1567	9,5498
58	0%	10,916	10,828
63	1%	31,735	31,366
65	2%	12,037	11,552

66	0%	25,893	26,105
67	4%	23,693	22,03
68	-3%	23,182	24,688
69	2%	7,6093	7,3064
70	3%	6,5114	6,1047
71	3%	15,692	14,747
72	4%	13,139	12,186
73	4%	11,578	10,645
74	-2%	17,123	17,748
75	4%	10,655	9,8665
76	3%	12,129	11,34
77	1%	55,103	55,773
78	3%	8,292	7,8087
79	-3%	11,45	12,272
80	9%	6,7875	5,6776
81	2%	8,7409	8,4514
82	1%	22,449	21,959
83	0%	24,845	25,066
84	0%	16,916	17,002
85	1%	14,703	14,958
86	-2%	20,76	21,623
87	0%	17,707	17,638
88	2%	15,023	14,352
89	0%	15,775	15,622
90	3%	12,817	12,034
91	3%	7,5859	7,0991
92	2%	10,6	10,098
93	1%	19,081	18,689
94	-4%	22,734	24,439
95	0%	22,11	22,184
96	-3%	20,283	21,357
97	-9%	11,75	14,211
98	4%	44,043	40,323
99	-2%	41,871	43,229
100	1%	16,971	16,529
101	1%	12,777	12,541
102	0%	18,71	18,75
103	1%	44,788	45,657
104	2%	17,134	16,471
105	1%	15,139	14,931
106	1%	17,347	17,174
107	-6%	15,229	17,19
108	2%	22,271	21,257
109	3%	10,93	10,206
110	-2%	19,295	20,134
111	0%	12,408	12,345

112	0%	13,476	13,438
113	1%	12,962	12,719
114	4%	16,004	14,914
115	-3%	8,6975	9,1726
116	0%	8,3672	8,3084
117	0%	6,2075	6,1616
118	0%	11,145	11,079
119	0%	16,159	16,267
120	1%	7,3203	7,1479
121	-3%	16,276	17,193
122	-1%	23,718	24,363
123	-2%	20,883	21,875
124	1%	17,444	17,723
125	1%	16,98	16,65
126	2%	20,747	19,973
127	-3%	15,569	16,542
128	0%	37,523	37,231
129	3%	12,353	11,667
130	1%	16,538	16,724
131	-2%	14,638	15,216
132	4%	13,025	12,017
133	1%	33,361	32,726
134	1%	10,333	10,142
135	3%	9,528	8,9782
136	1%	8,8554	8,9624
137	1%	23,98	23,464
138	1%	51,839	52,652
139	-2%	21,777	22,651
140	2%	20,723	20,022
141	-4%	7,006	7,6561
142	1%	5,4338	5,3391
143	3%	6,2491	5,8502
144	3%	8,6921	8,2482
145	3%	5,9326	5,5847
146	0%	36,323	35,973
147	1%	11,886	12,012
148	0%	17,834	17,736
149	2%	7,9463	7,6126
150	2%	5,9571	5,7234
151	0%	24,234	24,459
152	21%	5,9334	3,8532
153	1%	6,7698	6,5894
154	-3%	26,744	28,516
155	1%	36,196	35,329
156	0%	11,946	11,868
157	-4%	14,123	15,372

158	-1%	11,956	12,263
159	3%	10,753	10,123
160	1%	9,7192	9,8976
161	-2%	12,364	12,855
162	0%	14,366	14,462
166	-2%	31,714	32,797
167	2%	16,578	15,922
215	2%	5,5918	5,3668
216	1%	4,4714	4,4267
217	2%	8,4967	8,0908
219	4%	4,994	4,5981
221	9%	7,6814	6,4178
229	4%	4,6381	4,2763
235	0%	3,5806	3,5709
236	0%	5,4903	5,5295
237	1%	8,6464	8,4909
238	0%	12,587	12,625
239	4%	3,3911	3,1069
246	3%	6,2705	5,9015
261	-1%	12,812	13,095
268	3%	9,717	9,2003
271	0%	11,001	10,969
272	-4%	3,0846	3,3319
360	0%	13,819	13,839
363	-4%	19,577	21,165
364	2%	8,1114	7,8442
366	2%	10,892	10,451
368	2%	9,9869	9,6634
369	-10%	12,38	15,168
370	0%	8,5101	8,5952
371	0%	19,416	19,357
372	-3%	26,207	27,899
373	-1%	7,2629	7,4628
374	-4%	6,4082	6,8836
375	-46%	17,391	46,509

Annexe V : Facies chimique

Nom	Faciès
6	Sulfaté calcique
7	Bicarbonaté calcique
8	Sulfaté magnésien
9	Chloruré magnésien
11	Bicarbonaté calcique
12	Sulfaté calcique
13	Sulfaté calcique
14	Bicarbonaté calcique
15	Sulfaté calcique
16	Bicarbonaté calcique
17	Bicarbonaté calcique
18	Sulfaté magnésien
19	Sulfaté calcique
20	Sulfaté calcique
26	Bicarbonaté calcique
27	Bicarbonaté calcique
28	Bicarbonaté calcique
29	Bicarbonaté calcique
30	Sulfaté calcique
31	Bicarbonaté calcique
32	Bicarbonaté calcique
33	Bicarbonaté calcique
34	Bicarbonaté calcique
35	Sulfaté magnésien
36	Sulfaté calcique
38	Bicarbonaté calcique
39	Sulfaté calcique
40	Sulfaté calcique
41	Sulfaté calcique
42	Sulfaté calcique
43	Bicarbonaté calcique
44	Sulfaté calcique
45	Sulfaté calcique
47	Bicarbonaté calcique
52	Sulfaté calcique
53	Sulfaté calcique
54	Sulfaté calcique
55	Sulfaté calcique
56	Sulfaté calcique
57	Bicarbonaté calcique
58	Bicarbonaté calcique
63	Sulfaté calcique
65	Sulfaté magnésien
66	Sulfaté magnésien

67	Sulfaté magnésien
68	Sulfaté calcique
69	Bicarbonaté calcique
70	Bicarbonaté calcique
71	Bicarbonaté calcique
72	Bicarbonaté magnésien
73	Bicarbonaté magnésien
74	Sulfaté magnésien
75	Bicarbonaté calcique
76	Sulfaté magnésien
77	Sulfaté calcique
78	Bicarbonaté calcique
79	Chloruré calcique
80	Bicarbonaté calcique
81	Bicarbonaté calcique
82	Sulfaté calcique
83	Sulfaté calcique
84	Sulfaté magnésien
85	Chloruré calcique
86	Sulfaté calcique
87	Sulfaté magnésien
88	Sulfaté calcique
89	Sulfaté magnésien
90	Sulfaté calcique
91	Bicarbonaté calcique
92	Bicarbonaté calcique
93	Sulfaté sodique
94	Chloruré calcique
95	Sulfaté calcique
96	Sulfaté magnésien
97	Sulfaté calcique
98	Sulfaté calcique
99	Sulfaté calcique
100	Sulfaté calcique
101	Sulfaté calcique
102	Sulfaté calcique
103	Sulfaté calcique
104	Sulfaté calcique
105	Chloruré magnésien
106	Sulfaté calcique
107	Bicarbonaté calcique
108	Chloruré calcique
109	Chloruré calcique
110	Sulfaté calcique
111	Chloruré calcique
112	Sulfaté calcique

113	Sulfaté calcique
114	Sulfaté calcique
115	Bicarbonaté calcique
116	Bicarbonaté calcique
117	Bicarbonaté calcique
118	Sulfaté calcique
119	Sulfaté calcique
120	Bicarbonaté calcique
121	Sulfaté calcique
122	Sulfaté calcique
123	Sulfaté calcique
124	Bicarbonaté magnésien
125	Sulfaté calcique
126	Chloruré calcique
127	Chloruré calcique
128	Sulfaté magnésien
129	Bicarbonaté calcique
130	Sulfaté calcique
131	Sulfaté calcique
132	Sulfaté calcique
133	Sulfaté calcique
134	Bicarbonaté calcique
135	Bicarbonaté calcique
136	Bicarbonaté calcique
137	Sulfaté magnésien
138	Chloruré calcique
139	Chloruré calcique
141	Sulfaté calcique
142	Bicarbonaté calcique
143	Bicarbonaté calcique
144	Bicarbonaté calcique
145	Sulfaté magnésien
146	Sulfaté magnésien
147	Sulfaté magnésien
148	Sulfaté calcique
149	Bicarbonaté calcique
150	Bicarbonaté calcique
151	Sulfaté calcique
152	Sulfaté calcique
153	Bicarbonaté calcique
154	Chloruré magnésien
155	Sulfaté magnésien
156	Sulfaté calcique
157	Bicarbonaté calcique
158	Sulfaté calcique
159	Bicarbonaté calcique

160	Bicarbonaté calcique
161	Sulfaté calcique
162	Sulfaté calcique
166	Sulfaté calcique
167	Sulfaté calcique
215	Bicarbonaté calcique
216	Bicarbonaté calcique
217	Bicarbonaté calcique
219	Bicarbonaté calcique
221	Bicarbonaté calcique
229	Bicarbonaté calcique
235	Bicarbonaté calcique
236	Bicarbonaté calcique
237	Bicarbonaté calcique
238	Chloruré calcique
239	Bicarbonaté calcique
246	Bicarbonaté calcique
261	Bicarbonaté calcique
268	Sulfaté calcique
271	Bicarbonaté calcique
272	Bicarbonaté calcique
360	Sulfaté calcique
363	Sulfaté calcique
364	Bicarbonaté calcique
366	Sulfaté calcique
368	Sulfaté calcique
369	Sulfaté calcique
370	Bicarbonaté calcique
371	Sulfaté magnésien
372	Sulfaté calcique
373	Bicarbonaté calcique
374	Bicarbonaté calcique
375	Sulfaté magnésien

Annexe VI : Dureté

Nom	Dureté	Classification
6	123	Très dure
7	32	Dure
8	51	très dure
9	174	Très dure
11	31	dure
12	69	Très dure
13	50	Très dure
14	31	dure
15	30	plutôt dure
16	18	plutôt dure
17	31	dure
18	47	Très dure
19	58	Très dure
20	24	plutôt dure
26	25	plutôt dure
27	46	Très dure
28	40	Très dure
29	30	plutôt dure
30	47	Très dure
31	37	Dure
32	18	plutôt dure
33	25	plutôt dure
34	34	Dure
35	67	Très dure
36	80	Très dure
38	34	Dure
39	38	Dure
40	45	Très dure
41	65	Très dure
42	135	Très dure
43	32	Dure
44	69	Très dure
45	81	Très dure
47	30	plutôt dure
52	134	Très dure
53	46	Très dure
54	212	Très dure
55	99	Très dure
56	70	Très dure
57	38	Dure
58	43	Dure
63	47	Très dure
65	95	Très dure
66	88	Très dure

67	32	Dure
68	29	plutôt dure
69	67	très dure
70	55	très dure
71	47	Très dure
72	71	Très dure
73	43	Très dure
74	46	Très dure
75	219	Très dure
76	36	dure
77	51	Très dure
78	32	dure
79	40	Dure
80	92	Très dure
81	100	Très dure
82	64	Très dure
83	59	Très dure
84	84	Très dure
85	67	Très dure
86	57	Très dure
87	53	Très dure
88	51	Très dure
89	24	plutôt dure
90	36	Dure
91	61	Très dure
92	98	Très dure
93	81	Très dure
94	76	Très dure
95	50	Très dure
96	145	Très dure
97	153	Très dure
98	66	Très dure
99	48	Très dure
100	75	Très dure
101	158	Très dure
102	68	Très dure
103	60	Très dure
104	71	Très dure
105	60	Très dure
106	92	Très dure
107	44	Très dure
108	79	Très dure
109	51	Très dure
110	59	Très dure
111	59	Très dure
112	64	Très dure

113	37	Dure
114	38	Dure
115	27	plutôt dure
116	51	Très dure
117	68	Très dure
118	30	plutôt dure
119	64	Très dure
120	78	Très dure
121	83	Très dure
122	70	Très dure
123	60	Très dure
124	79	Très dure
125	65	Très dure
126	118	Très dure
127	51	Très dure
128	68	Très dure
129	58	Très dure
130	51	Très dure
131	125	Très dure
132	43	Très dure
133	42	Très dure
134	37	Dure
135	81	Très dure
136	198	Très dure
137	75	Très dure
138	90	Très dure
139	30	plutôt dure
140	24	plutôt dure
141	28	plutôt dure
142	38	Dure
143	26	plutôt dure
144	144	Très dure
145	44	Très dure
146	77	Très dure
147	34	Dure
148	27	plutôt dure
149	109	Très dure
150	24	plutôt dure
151	32	Dure
152	108	Très dure
153	144	Très dure
154	52	Très dure
155	60	Très dure
156	52	Très dure
157	46	Très dure
158	44	Très dure

159	52	Très dure
160	62	Très dure
161	25	plutôt dure
162	21	plutôt dure
215	39	Dure
216	22	plutôt dure
217	33	Dure
219	22	plutôt dure
221	16	plutôt dure
229	24	plutôt dure
235	33	Dure
236	53	Très dure
237	16	plutôt dure
238	27	plutôt dure
239	52	Très dure
246	48	Très dure
261	14	douce
268	57	Très dure
271	76	Très dure
272	35	dure
360	47	Très dure
363	44	Très dure
364	43	Très dure
366	37	Dure
368	85	Très dure
369	118	Très dure
370	29	plutôt dure
371	29	plutôt dure
372	63	Très dure
373	136	Très dure
374	73	Très dure
375	29	plutôt dure
166	73	Très dure
167	105	Très dure

Annexe V : SAR

Nom	SAR
6	1,05278944
7	0,60961592
8	1,50007929
9	2,63858804
11	0,56383609
12	1,70555927
13	1,65776539
14	0,69066325
15	0,62588384
16	0,65186286
17	0,98062617
18	1,70264112
19	2,72005946
20	1,55611686
26	0,33115431
27	0,40561848
28	0,43417793
29	0,30219423
30	0,53971876
31	0,45048531
32	0,22759175
33	0,35581748
34	0,40109633
35	1,12259639
36	1,4189442
38	0,76035138
39	0,82994053
40	1,0639318
41	1,6186936
42	1,15899235
43	0,36535615
44	0,61237313
45	1,496355
47	0,63299612
52	1,48804468
53	0,77027101
54	1,10627856
55	1,45206856
56	1,47985088
57	0,70993133
58	1,00548444
63	2,03247361
65	1,10718331
66	1,40626455

67	1,45626714
68	1,83601722
69	0,55683574
70	0,38372698
71	0,75615881
72	0,81345394
73	0,89844778
74	0,97926426
75	0,90170393
76	1,27345665
77	2,24772952
78	0,45553677
79	0,47950566
80	0,24505818
81	0,32547213
82	1,2940268
83	1,46946734
84	1,63773329
85	1,16528526
86	1,35097559
87	1,68638073
88	1,49697823
89	2,16562704
90	1,1218652
91	1,61445969
92	1,70919388
93	2,68938483
94	0,97359479
95	2,06738771
96	1,81272449
97	0,67746917
98	3,88224247
99	2,81302363
100	1,40355932
101	1,28423453
102	1,31954933
103	3,30870066
104	1,0856299
105	1,15773819
106	1,14476682
107	1,24808375
108	1,221709
109	0,93483913
110	1,18809101
111	0,96391279
112	0,66214475

113	0,44820949
114	1,20091534
115	0,60760092
116	0,40343223
117	0,39795985
118	0,34568528
119	0,91527567
120	0,49949717
121	1,32137453
122	2,80053976
123	1,4322558
124	1,31934656
125	1,94785874
126	1,70182447
127	1,02732464
128	4,05828484
129	0,92855185
130	1,04817073
131	1,26888147
132	1,1132259
133	2,21027916
134	0,84191776
135	0,53174389
136	0,6339447
137	2,60421676
138	2,73847932
139	2,38879376
140	0,90087806
141	0,45039747
142	0,33570743
143	0,3369566
144	0,48984909
145	0,40351682
146	1,94863128
147	1,38386059
148	0,86241876
149	0,64065436
150	0,31813455
151	0,65754829
152	0,70230152
153	0,24490471
154	1,51983591
155	1,92702689
156	0,6685171
157	0,79616482
158	0,66899457

159	0,71060708
160	0,41477953
161	0,81956691
162	0,78827193
215	0,32867327
216	0,14957926
217	0,33053219
219	0,44415465
221	0,60003673
229	0,20746074
235	0,23883686
236	0,42062691
237	1,12962345
238	0,8118909
239	0,17335522
246	0,44989191
261	1,01328678
268	0,70539672
271	0,65811848
272	0,18584036
360	0,96730732
363	1,5803929
364	0,58237232
366	0,64035516
368	0,47534462
369	1,73943404
370	0,52073099
371	0,74406776
372	0,69555623
373	0,90062346
374	0,33452151
375	1,87612555
166	1,15439132
167	0,67680837

Annexe VIII : Indices de saturation

Nom	Is Calcite	Is Aragonite	Is Dolomite	Is Gypse	Is Anhydrite
6	1,19	1,04	2,42	-0,16	-0,38
7	0,32	0,18	0,51	-1,37	-1,59
8	1,06	0,91	2,42	-1,09	-1,31
9	0,98	0,83	2,27	-0,14	-0,36
11	0,65	0,5	1,19	-1,36	-1,58
12	0,9	0,75	1,9	-0,68	-0,9
13	1,08	0,94	1,93	-0,93	-1,15
14	0,62	0,48	0,96	-1,31	-1,53
15	0,59	0,45	0,9	-1,19	-1,41
16	0,35	0,2	0,59	-1,76	-1,99
17	0,77	0,62	1,43	-1,29	-1,51
18	0,85	0,7	1,82	-1,04	-1,26
19	0,5	0,36	0,76	-0,64	-0,86
20	0,16	0,02	0,01	-1,29	-1,51
26	-0,02	-0,16	-0,08	-1,71	-1,93
27	0,7	0,56	1,22	-1,01	-1,23
28	0,61	0,47	1,25	-1,19	-1,41
29	0,74	0,59	1,3	-1,48	-1,7
30	0,54	0,39	0,79	-0,77	-0,99
31	0,37	0,23	0,57	-1,23	-1,45
32	-0,2	-0,35	-0,55	-1,98	-2,2
33	0,49	0,35	0,95	-1,56	-1,78
34	0,73	0,58	1,22	-1,4	-1,62
35	0,75	0,61	1,7	-0,8	-1,02
36	0,29	0,15	0,46	-0,39	-0,61
38	0,33	0,19	0,76	-1,38	-1,6
39	0,32	0,18	0,57	-1,17	-1,39
40	0,89	0,74	1,8	-0,99	-1,21
41	0,4	0,26	0,53	-0,49	-0,71
42	1,28	1,14	2,1	0,14	-0,08
43	0,51	0,36	0,93	-1,71	-1,93
44	0,87	0,73	1,69	-0,68	-0,9
45	0,78	0,64	1,52	-0,47	-0,69
47	0,51	0,37	0,8	-1,33	-1,55
52	1,2	1,06	2,11	0,11	-0,12
53	0,73	0,58	1,4	-1	-1,22
54	1,37	1,23	2,28	0,17	-0,05

55	0,79	0,65	1,6	-0,22	-0,44
56	0,86	0,71	1,66	-0,49	-0,71
57	0,53	0,39	0,96	-1,17	-1,39
58	0,87	0,73	1,46	-1,01	-1,23
63	0,82	0,68	1,67	-0,09	-0,31
65	-0,06	-0,2	0,19	-0,96	-1,18
66	0,99	0,85	2,24	-0,43	-0,65
67	0,69	0,55	1,63	-0,59	-0,81
68	0,93	0,78	1,97	-0,42	-0,64
69	0,83	0,68	1,71	-1,57	-1,79
70	0,61	0,46	1,12	-1,85	-2,07
71	1,1	0,95	2,33	#	#
72	0,67	0,52	1,68	-1,22	-1,44
73	0,79	0,65	1,78	-1,27	-1,49
74	0,75	0,6	1,9	-0,85	-1,07
75	0,91	0,76	1,91	-1,26	-1,48
76	0,54	0,4	1,29	-1,08	-1,3
77	1,18	1,03	2,11	0,48	0,26
78	-0,09	-0,23	-0,38	-1,32	-1,54
79	0,51	0,36	0,67	-1,24	-1,46
80	0,36	0,21	0,45	-1,8	-2,02
81	0,76	0,62	1,39	-1,22	-1,44
82	0,81	0,67	1,57	-0,38	-0,6
83	0,9	0,76	1,72	-0,33	-0,55
84	0,89	0,75	2,01	-0,89	-1,11
85	0,56	0,42	1,11	-0,94	-1,16
86	0,57	0,42	1,26	-0,62	-0,84
87	0,74	0,59	1,76	-0,85	-1,07
88	0,78	0,63	1,63	-0,85	-1,07
89	0,3	0,15	0,75	-0,84	-1,06
90	0,53	0,38	1,1	-0,96	-1,18
91	0,01	-0,13	0,05	-1,45	-1,67
92	0,48	0,34	0,96	-1,24	-1,46
93	0,6	0,45	1,28	-0,67	-0,89
94	0,76	0,61	1,47	-0,56	-0,78
95	0,65	0,51	1,4	-0,54	-0,76
96	0,79	0,65	1,81	-0,64	-0,86
97	0,94	0,8	1,9	-0,8	-1,02
98	1,09	0,95	2,31	0,02	-0,2

99	1,03	0,89	2,2	-0,04	-0,26
100	0,71	0,57	1,39	-0,68	-0,9
101	0,51	0,36	0,9	-0,84	-1,06
102	0,52	0,37	1	-0,53	-0,75
103	1,06	0,92	2,15	0,01	-0,21
104	0,85	0,71	1,67	-0,74	-0,96
105	0,83	0,68	1,81	-1,04	-1,26
106	0,84	0,69	1,58	-0,69	-0,91
107	1,2	1,06	2,45	-0,9	-1,12
108	0,88	0,73	1,56	-0,55	-0,77
109	0,86	0,71	1,54	-1,06	-1,28
110	0,77	0,63	1,57	-0,58	-0,8
111	0,84	0,69	1,7	-1,06	-1,28
112	0,93	0,79	1,97	-0,88	-1,1
113	0,78	0,64	1,34	-0,69	-0,91
114	0,22	0,07	0,34	-0,52	-0,74
115	0,37	0,23	0,17	-1,11	-1,33
116	0,14	0	0,31	-1,28	-1,5
117	0,78	0,63	1,16	-1,55	-1,77
118	0,7	0,55	1,22	-0,9	-1,12
119	0,94	0,8	1,84	-0,61	-0,83
120	0,51	0,36	0,83	-1,63	-1,85
121	0,49	0,34	0,74	-0,71	-0,93
122	1,08	0,94	2,15	-0,52	-0,74
123	1,12	0,97	2,17	-0,46	-0,68
124	1,01	0,87	2,17	-0,99	-1,21
125	1,02	0,87	2,08	-0,75	-0,97
126	0,86	0,72	1,77	-0,69	-0,91
127	0,9	0,75	1,89	-0,86	-1,08
128	1,1	0,96	2,58	-0,31	-0,53
129	0,78	0,64	1,65	-1,07	-1,29
130	0,79	0,65	1,47	-0,63	-0,85
131	0,47	0,32	1,06	-0,77	-0,99
132	0	-0,14	-0,1	-0,85	-1,07
133	0,48	0,34	0,9	-0,21	-0,43
134	0,67	0,53	1,05	-1,14	-1,36
135	0,87	0,72	1,7	-1,53	-1,75
136	0,68	0,54	1,04	-1,31	-1,53
137	1,15	1	2,49	-0,65	-0,87

138	1,25	1,1	2,58	-0,07	-0,29
139	1,13	0,98	2,05	-0,79	-1,01
141	0,13	0,01	0,31	-1,24	-1,46
142	0,32	-0,01	-0,55	-1,5	-1,72
143	0,4	0,18	0,56	-1,58	-1,8
144	0,31	0,26	0,82	-1,36	-1,58
145	0,83	0,16	0,12	-1,52	-1,74
146	0,68	0,69	2,24	-0,51	-0,73
147	0,74	0,54	1,47	-1,19	-1,41
148	0,72	0,59	1,39	-0,47	-0,69
149	0,44	0,58	1,03	-1,4	-1,62
150	0,92	0,3	0,01	-1,46	-1,68
151	-0,09	0,77	1,5	-0,01	-0,23
152	0,75	-0,23	-0,54	-1,52	-1,74
153	0,76	0,6	0,94	-1,44	-1,66
154	1,03	0,62	1,74	-0,5	-0,72
155	0,82	0,88	2,36	-0,18	-0,4
156	1,14	0,67	1,53	-0,92	-1,14
157	0,61	0,99	2,01	-0,94	-1,16
158	0,72	0,47	1,09	-0,86	-1,08
159	1,05	0,58	1,33	-1,1	-1,32
160	1	0,9	1,98	-1,11	-1,33
161	0,68	0,86	1,99	-0,89	-1,11
162	1,05	0,54	1,42	-0,78	-1
215	0,7	0,91	2	0,02	-0,2
216	0,18	0,55	1,39	-0,61	-0,83
217	-0,06	0,03	-0,04	-1,72	-1,94
219	0,22	-0,2	-0,36	-1,75	-1,97
221	0,15	0,08	0,2	-1,35	-1,57
229	0,46	0,01	-0,2	-1,82	-2,04
235	-0,38	0,31	0,6	-1,49	-1,71
236	-0,5	-0,53	-0,88	-1,92	-2,14
237	0,38	-0,65	-1,29	-2,17	-2,39
238	0,54	0,24	0,35	-1,51	-1,73
239	0,71	0,4	0,8	-1,25	-1,47
246	-0,34	0,56	1,12	-1,16	-1,38
261	0,59	-0,48	-0,78	-2,33	-2,55
268	0,94	0,45	1,02	-1,42	-1,64
271	0,98	0,8	1,51	-0,81	-1,03

272	0,89	0,84	1,91	-1,23	-1,45
360	-0,03	0,74	1,6	-1,15	-1,37
363	0,55	-0,17	-0,59	-2,03	-2,25
364	0,71	0,4	0,81	-0,69	-0,91
366	0,81	0,56	1,42	-0,52	-0,74
368	0,84	0,66	1,08	-1,37	-1,59
369	-0,17	0,7	1,47	-0,96	-1,18
370	-0,02	-0,31	-0,67	-1	-1,22
371	0	-0,17	-0,15	-0,78	-1
372	0,12	-0,15	-0,33	-1,24	-1,46
373	0,24	-0,02	0,57	-0,63	-0,85
374	-0,1	0,1	0,61	-0,15	-0,37
375	-0,31	-0,24	-0,26	-1,88	-2,1
166	-0,54	-0,45	-0,68	-1,48	-1,7
167	-0,54	-0,68	-0,43	-0,52	-0,74

Annexe IX : Indice d'échange de base

Nom	IEB
6	0,10752287
7	-0,23101234
8	-0,24055103
9	0,46605873
11	0,04535141
12	0,1649992
13	0,08412168
14	0,16545478
15	0,17455151
16	-0,34250383
17	-0,03270427
18	0,05847087
19	0,08946981
20	-0,03308517
26	0,31582626
27	0,09296286
28	0,09296286
29	-0,59638383
30	0,21539825
31	-0,20943287
32	-0,62355527
33	-0,09304593
34	0,14733291
35	0,32171775
36	-0,0097264
38	-0,15017372
39	0,01881943
40	-0,12965256
41	-0,06039512
42	-0,24530036
43	0,56042326
44	0,15895968
45	0,39311098
47	0,10300953
52	-0,25012409
53	-0,03711298
54	0,13972034
55	-1,57481183
56	-0,21703203
57	0,19895822
58	-0,08367289
63	-0,31122614
65	-0,06331049
66	0,38151662

67	0,19611703
68	0,09082251
69	-0,16879723
70	0,13826682
71	-0,24899095
72	0,18562987
73	-0,64285827
74	0,31060742
75	-0,45319436
76	-0,27107467
77	-0,32855978
78	0,11563414
79	0,74986463
80	0,138266
81	0,28728146
82	0,24639286
83	0,15230886
84	0,27650762
85	0,45334938
86	0,47924025
87	-0,04016781
88	0,03644791
89	-0,20645474
90	0,26313407
91	-1,1286851
92	-0,67820604
93	-0,24252573
94	0,62506293
95	0,18533482
96	0,16671888
97	0,21991019
98	-1,17335542
99	0,32335236
100	0,26371748
101	0,24617472
102	0,38358618
103	0,27654194
104	0,42485255
105	0,38466329
106	0,33301495
107	0,26298693
108	0,56877639
109	0,14834554
110	0,38175885
111	0,45572019
112	0,15895968

113	-0,05442701
114	-0,23970299
115	0,45688012
116	0,34285827
117	0,26305061
118	0,58153155
119	0,26296679
120	0,31624305
121	0,39268786
122	-0,06167128
123	0,06168624
124	0,07273038
125	-0,3933235
126	0,40653535
127	0,58069929
128	-0,41769109
129	0,11708816
130	0,18651654
131	-0,10669007
132	0,42585348
133	0,19724138
134	0,29447333
135	0,24957777
136	0,1292425
137	-0,23770642
138	0,45231404
139	0,31518027
141	-0,36422939
142	0,46937871
143	0,37539758
144	0,24891158
145	0,28728146
146	0,11101762
147	-0,52786163
148	0,212444
149	-0,08619162
150	-0,01593604
151	-0,19223055
152	-0,15328903
153	0,6919125
154	0,60425978
155	0,075051
156	0,34367049
157	0,48488693
158	0,48460051
159	0,30265899

160	0,49760009
161	0,23299062
162	0,31318837
166	0,22350956
167	0,56912414
215	0,73741976
216	0,03845936
217	0,12315449
219	0,41492209
221	0,41492209
229	0,03845936
235	-0,14298571
236	0,6413385
237	0,56912414
238	-1,04996455
239	0,20750959
246	0,36388212
261	0,52088504
268	0,51022463
271	0,4375892
272	0,38457164
360	0,1926895
363	0,488389
364	0,65216265
366	-0,77913496
368	0,11110061
369	-0,03184578
370	-0,20343181
371	-0,82935275
372	0,38549145
373	0,14006346
374	0,12512261
375	0,40736823