

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE



Mémoire
MASTER PROFESSIONNEL
Domaine : Sciences techniques
Filière: Hydraulique
Spécialité: Traitement, Epuration et Gestion Des Ressources en Eaux
Présenté par : BEN YAZZA Abd elmalek

THEME

**EVALUATION DES FACIES HYDRO-CHIMIQUE
DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION
D'IN-SALAH
(WILAYA DE TAMANRASSET)**

Soutenu publiquement le : 10 Juin 2014
Devant le jury composé de:

Mr. Dr.KATEB Samir	M.C.B	Président	U.K.M.Ouargla
Mme.BEL MABEDI Amel	M.A.A	Examinatrice	U.K.M.Ouargla
Mr.ZAGAIT Rachid	M.A.A	Encadreur	U.K.M.Ouargla

Année universitaire 2013/2014

Remerciements

Nous remercions s'adressent premièrement et avant tout au « Dieu » tout puissant, qui nous a aidés à réaliser ce travail, et pour sa grâce tout au long de notre vie professionnelle et personnelle.

Nous tenons à remercier vivement notre enseignant encadreur

Mr : zegait rachid pour ses conseils, orientations et sa disponibilité le long de l'élaboration de ce travail.

Ainsi que Au membre de jury qui ont bien voulu examiner notre travail et de l'apprécier à sa juste valeur.

Nous adressons aussi notre sincères remerciments à l'ensemble des enseignants de L'UNIVERSITE DE KASDI MERBAH Ouargla qui contribué à ma formation.

Remercie tous sincèrement et sans exception tous nos précepteurs, directeurs, administrateurs et enseignants de l'école primaire, de l'école fondamentale, du lycée et DEPARTEMENT de Hydraulique et Génie civil

Merci infiniment à nos familles et tous les amis et collègues grâce aux quels nous avons pu atteindre cette modeste sommet de connaissance.

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :
A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et
qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien,
surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le
déroulement de mes études.

Pour ma femme, qui m'a encouragé et a été
Cindy Seulement pour l'accomplissement de ce travail
pour valentines mon cœur mes enfants

Abdelmoumen , Abdelouadoudé ; Abdelmohaymen

A tous mes frères et sœurs.

A mes meilleurs amis

A Tous ceux que j'aime et je respecte.

*En fin, je remercie mon trinôme TEFICHE ILYAS . BEDDOUDA
ABDERRAHMANE et MEZZANE SAMIR qui a contribué à la réalisation de ce
modeste travail.*

Ben Yazza Abdelmalek

Sommaire

Introduction générale:.....	1
Chapitre I : Analyses des conditions naturelles	
I-Généralité:.....	3
I-1-Situation administrative.....	3
I-2-Situation géographique:.....	4
I-2-1- cadre physique :.....	5
I-2-2-Plans d'activités.....	5
II-Hydro climatologie.....	5
II-1-Introduction :.....	5
II-2-Analyse climatique :.....	6
II-2-1-1-Température En °C:.....	6
II-2-1-2-Vitesse Du Vent:.....	7
II-2-1-3-Insolation:.....	8
II-2-1-4-Précipitation:.....	9
II-2-2-Le Régime Hydrique :.....	10
II-2-2-1-Humidité:.....	10
II-2-2-2-L'évaporation et l'évapotranspiration.....	11
II-2-2-2-a-L'évaporation :	11
II-2-2-2-b-L'évapotranspiration.....	13
II-3-CONCLUSION :.....	13
III-Hydrogéologie.....	14
III-1-Introduction	14
III-2-Système aquifère locale	14
III-3-Puissance du réservoir du CI.....	16
III-4-Potentialité en eau	16
III-4-1-Les forages d'AEP.....	16
III-4-2-Forage d'irrigation.....	17
III-5-Conclusion	18
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	
I. Méthodologie d'échantillonnage.....	20
I.1. Zone d'échantillonnage	20

Sommaire

I.1. Choix des points de prélèvement	20
I.2 Exécution des prélèvements.....	22
I.3. Stockage des échantillons.....	22
I.4. Mesures in situ	22
I.5. Mesures et analyses au laboratoire.....	23
I.5.1. Dosage du calcium et du magnésium	23
I.5.2. Dosage du sodium et du potassium	23
I.5.3. Dosage des chlorures.....	24
I.5.4. Dosage des sulfates.....	24
I.5.5. Dosage des bicarbonates.....	24
I.6.6. Dosage des nitrates.....	24
II. Outils d'analyse des données	28
II.1. Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.)	28
II.2. Logiciel XLSTAT.....	30
CHAPITRE III. : INTERPRETATION DES DONNEES HYDROCHIMIQUES	
. Introduction.....	32
I. Classification chimiques des eaux souterraines	33
I.1. Classification des eaux souterraines selon PIPER.....	33
I.2. Classification des eaux souterraines selon Schoeller-Berkaloff.....	33
II. Evaluation de la qualité des eaux souterraines dans In-Salah.....	40
II.1. Evaluation de la qualité des eaux souterraines d'In-Salah pour l'irrigation.....	40
II.1.1. Evaluation du risque de salinité.....	40
II.1.2. Evaluation du risque d'alcalinité.....	41
II.1.3. Classes d'irrigation.....	42
II.1.4. Récapitulation sur l'aptitude des eaux d'In-Salah pour l'irrigation.....	43
II.2. Evaluation de la qualité des eaux d'In-Salah pour la potabilité	44
III Etude statistique des données hydrochimiques.....	50
III.1 .Statistique descriptive.....	50
III.1.1. Conductivité électrique.....	51
III.1 .2. Calcium.....	51
III.1.3. Magnésium.....	52
III.1 .4. Sodium.....	52
III.1.5. Potassium.....	52

Sommaire

III.1.6. Chlorures.....	52
III.1.7. Sulfates.....	53
III.1.8. Bicarbonates.....	53
III.1.9. Nitrates.....	53
III.2 Corrélation entre les variables.....	53
IV. Analyse en composantes principales (A.C.P.)	58
IV.1. Principe de l'ACP.....	59
IV.2. Application de l'ACP.....	59
IV.2.1. Etude des valeurs propres.....	59
IV.2.2. Etude des variables.....	60
IV.2.3 Etude des individus.....	61
CONCLUSION GENERALE.....	65

LISTE DES TABLEAUX:

N°	Tableau	Page
1	Les coordonnées géographiques de la station d’In-Salah.	6
2	Températures mensuelles en °C pour la série de 32 ans (1981/2012). Station d’In Salah (1981-2012).	6
3	Forces des vents en mensuelles en m/s pour la série de 32 ans 1981/2012).	7
4	Insolation mensuelles en 1/10h pour la série de 32 ans (1981-2013).	8
5	Précipitations mensuelles en mm pour la série de 32 ans (1981/2012).	9
6	Humidité relative mensuelles en mm pour la série de 32 ans (1981/2012).	10
7	Représente les moyennes mensuelles de l’évaporation en (mm) pendant les périodes de (1981-2013).	11
8	présente la précipitation annuelle et température annuelle (1981-2012)	12
9	Les forages d’AEP d’In-Salah	17
10	Les forages d’irrigation d’In-Salah.	17
11	Classification de l’eau basée sur la concentration totale en sels, selon Ayers et Westcot (1976)	39
12	Les normes physico-chimiques d’une eau potable selon l’OMS et les normes algérienne les points d’eau dépassant les normes dans In-Salah	42
13	Paramètres statistiques des variables physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines d’In-Salah	49
14	Matrice de corrélation entre les variables	52
15	Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux	57
16	Corrélation des variables par rapport aux axes principaux	58

Liste des photos

N°	Tableau	Page
1	Forage Chedda	20
2	Forage profond Lefguiguira	21
3	Forage d'irrigation à In-Salah (El-Mansoura)	21
4	Conductimètre de terrain	23
5	Spectrophotomètre de flamme	25
6	L'étuve	25
7	Dessiccateur	26
8	Conductimètre de paille	26

Liste des figures

N°	Tableau	Page
1	Carte de situation de la wilaya de Tamanrasset	3
	Carte de situation géographique de la zone d'étude	4
2	Températures moyennes mensuelles	7
3	Forces des vents moyennes mensuelles	8
4	Insolation moyennes mensuelles	9
5	Précipitations moyennes mensuelles	10
6	Evaporation moyennes mensuelle	12
7	Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN de la région d'In-Salah	13
8	Carte des ressources en eau souterraines (Continental Intercalaire et Complexe Terminal), extrait de recueil des communications, 2002	14
9	Carte isobathe In-Salah	15
10	Carte isopaque Continental Intercalaire d'In-Salah	16
11	Coupe hydrogéologique dans la région d'In-Salah	16
12	Situation des forages d'aep d'In-Salah	17
13	Situation des forages d'irrigation d'In-Salah	17
14	Représentation de l'interface du logiciel d'hydrochimie	27
	Représentation de l'interface du logiciel XLSTAT	28
15	Représentation du diagramme de Piper	32
16	Représentation des eaux souterraines sur le diagramme de PIPER	32
17	Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff	34
18	Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff Suite	35
19	Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff Suite	36
20	Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff Suite	37
21	Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Riverside	45
22	Variation spatial de la conductivité électrique dans Tidikelt Est	45

Liste des Figures

23	Variation spatiale de la Ca^{++} dans Tidikelt Est	45
24	Variation spatiale de Na^+ dans Tidikelt Est	45
25	Variation spatiale de la dureté	46
26	Variation spatiale de sulfate	46
27	Variation spatiale de Potassium	46
28	Variation spatiale de Magnésium	47
29	Variation spatiale de Bicarbonate	47
30	Variation spatiale de Chlorure	47
31	Droite de régression entre la CE et ($NO_3^- + Na_2^{++} + Cl^-$)	53
32	Droite de régression de sodium en fonction de (Cl^-)	53
33	La conductivité est fortement corrélée avec le sodium	54
34	Droite de régression de conductivité en fonction de (Cl^-)	54
35	Droite de régression de conductivité en fonction de (NO_3^-)	55
36	Droite de régression de Chlorure en fonction de (SO_4^{--})	55
37	Droite de régression de Chlorure en fonction de (NO_3^-)	56
38	Histogramme des valeurs propres	58
39	Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe F1 et F2.	59
40	Répartition des individus dans le plan formé par les axes F1 et F2.	61

LISTE DES ABREVIATIONS

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

A.E.P : Alimentation en eau potable ;

C.T : Complexe Terminal ;

C.I : Continental Intercalaire ;

S.A.S.S : Système Aquifère du Sahara Septentrional

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PH : Potentiel d'Hydrogène ;

TH : Titre Hydrotimétrique ;

ACP: Analyse en Composantes Principales

AEP: Approvisionnement en eau potable

CE: Conductivité électrique

GPS: Global Positioning System

SAR: Sodium Absorption Ratio

RS : Résidu sec

U.S.S.L.: United State Salinity Laboratory

UTM : Universal Transverse Mercator

UV: Ultra-Violet

L.H.A: Laboratoire d'Hydrologie d'Avignon

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Introduction générale:

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

Malheureusement, dans plusieurs régions algériennes, surtout celles situées au Sahara, sont confrontées aujourd'hui à des problèmes liés à des aspects quantitatifs et qualitatifs des ressources en eau.

Toutes les eaux de la nature ne sont pas bonnes à boire. Même une eau d'apparence limpide transporte en son sein toutes sortes de substances inertes et vivantes, dont certaines peuvent être nocives pour l'organisme humain. Ces substances proviennent soit du milieu physique dans lequel l'eau a évolué, soit des rejets de certaines activités humaines dont l'eau est devenue le réceptacle. L'eau est ainsi le vecteur de transmission privilégié de nombreuses maladies.

Pour pouvoir être consommée sans danger, l'eau doit donc être traitée et classifiée. Mais la pollution croissante des réserves rend cette opération de plus en plus délicate.

L'objectif de ce travail est d'évaluer la qualité des eaux de la nappe souterraines au niveau d'In-Salah à travers l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques des eaux et des éléments dissous afin de déterminer leurs origine et les différentes faciès chimique et classifications des eaux, la connaissance des structures des variables d'une part et quantifier les familles d'eau par les analyses des individus d'autre part avec une approche statistique multidimensionnelle, avec l'aptitude de ces eaux dans l'A.E.P. et l'irrigation

Chapitre I

Analyse des conditions naturelles

I- générale Contexte:

I-1-Situation administrative

La commune d'In-Salah est l'une des plus anciennes commune du grand Sud algérien, elle fait partie du territoire de la wilaya de Tamanrasset.

La wilaya de Tamanrasset est Comprise entre les longitudes 0°15' et 10°15' Est, et entre et entre les latitudes 18°43' et 29°03' Nord, sa superficie s'étend sur environ 557906,25 km².

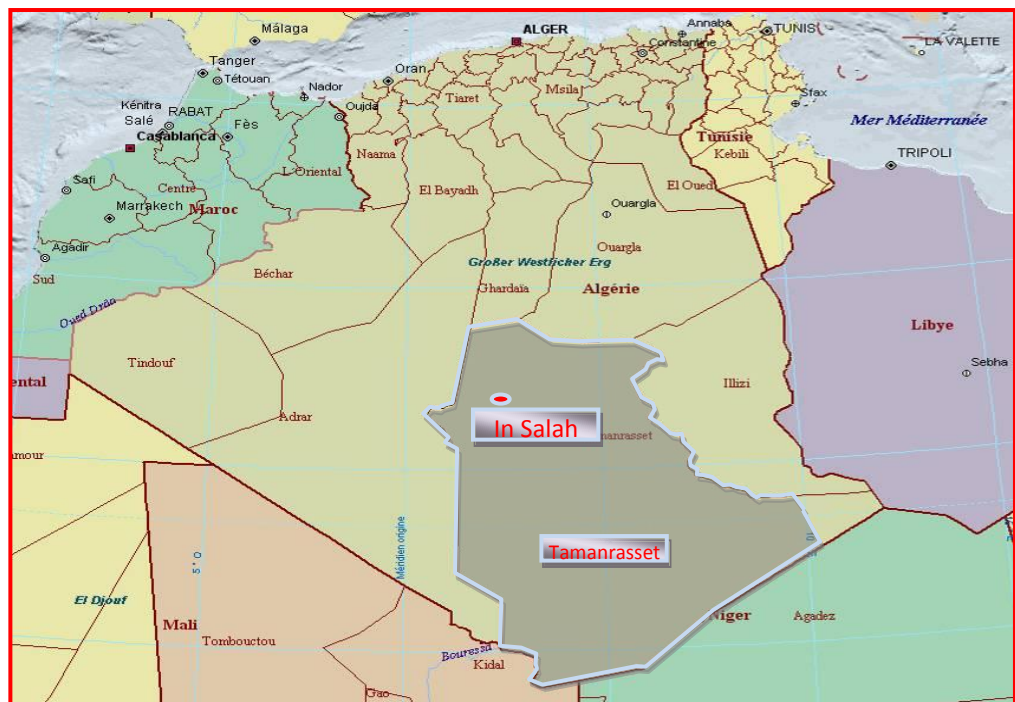


Figure-1 : Carte de situation de la wilaya de Tamanrasset

Comme le montre la figure -1, la wilaya de Tamanrasset est limitée par

- La Wilaya de Ghardaïa au Nord-ouest;
- La wilaya d’Ouargla au Nord-est;
- La Wilaya d’Illizi à L’Est;
- La Wilaya d’Adrar à l’Ouest;
- Le Mali au sud-ouest;
- Le Niger au Sud-est ;

La limite de In Salah est Au Nord : El golia. Sud : Tamanrasset. Est : Ilizi et Janet. Ouest Adrar.
BEN ALI (2013)

I-2-Situation géographique:

La région d'In-Salah est située au centre sud du Sahara algérien, au nord de la wilaya de Tamanrasset. Elle se situe à 1300 km au Sud d'Alger et à 700 km au du chef lieu de la wilaya de Tamanrasset, entre le plateau du Tademaït au Nord, à la lisière du Tidikelt au Sud. L'oasis est située à 27°11' de latitude Nord et à 2°28' de longitude Est. La région d'In-Salah est constituée de trois réalités géographiques : le plateau de Tidikelt, la plaine de Tademaït et la dépression de l'oued Djarret :

- Au Nord, une région relativement plane, composée du plateau de Tademaït, qui se présente sous la forme de Hamadas et l'aspect d'assises crevassées. Le plateau de Tademaït est recouvert par endroits de dunes de sables du fait d'une érosion éolienne très active.
- Au Sud Est, la plaine de Tidikelt, parfois recouverte d'ergs et reformant des ressources hydriques appréciables. Elle est incisée profondément par une succession de vallées qui la traversent dans une direction Nord-est.
- La dépression de l'Oued Djarret. Elle est limitée (figure 1): Au Nord : El golia. Sud : Tamanrasset. Est : Illizi et Janet. Ouest Adrar.

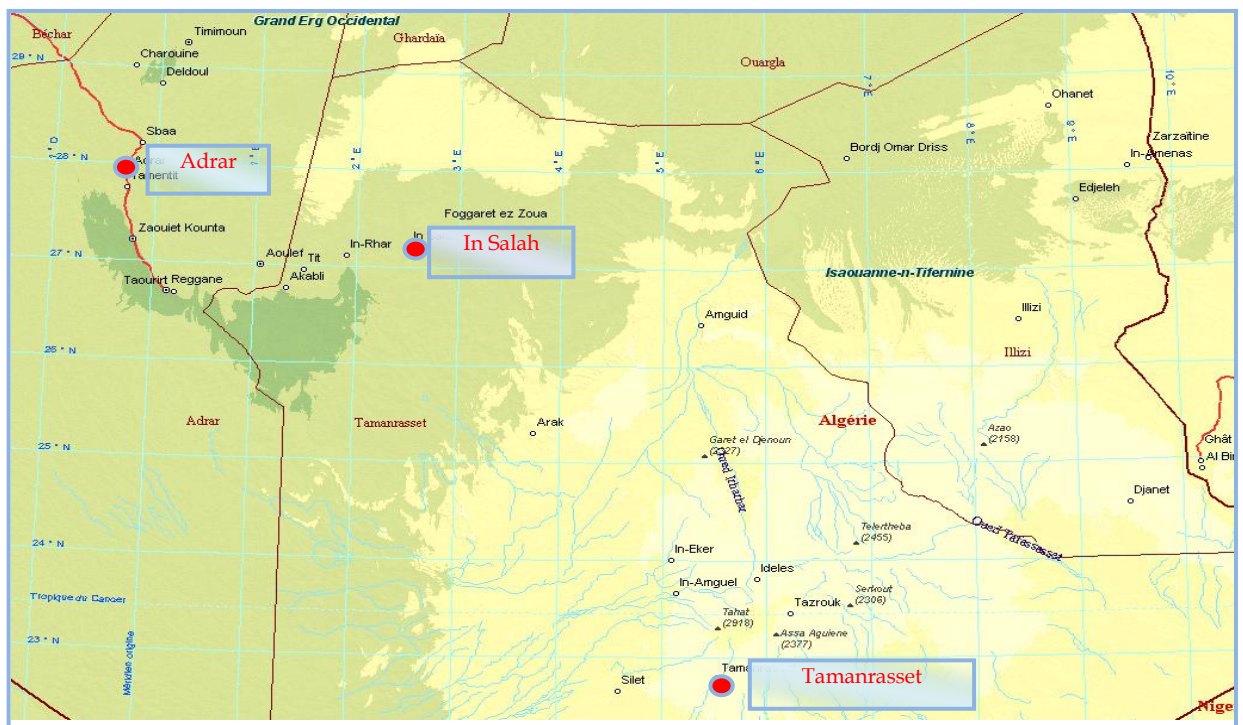


Fig. 2 : Carte de situation géographique de la zone d'étude

I-2-1- cadre physique :

La région est caractérisé par :

- Superficie de 43 937,50 Km² avec un pourcentage de 7,88 %, d'occupation des sols de la wilaya de Tamanrasset
- Population 35000 habitants (2008).
- La densité de population est de 0,79 / km².

I-2-2-Plans d'activités**a-Activités agricoles**

Les surfaces agricoles d'In-Salah se situent à l'extrémité Nord-ouest, au voisinage d'El Barka et au Nord-est d'In-Salah. La superficie agricole ancienne avoisine les 1 262 hectares, la superficie de l'APFA est de 8104 hectares. La superficie irriguée est de 834 hectares de l'APFA. Le nombre de palmeraies est d'environ 151 000. **BEN ALI** (2013)

II-Hydro climatologie:

Le climat de la région est continental excessif et qui se caractérise par une grande sécheresse due à la rareté des pluies, une température généralement élevée, avec un grand écart journalier n régime du vent irrégulier.

Ces paramètres hydro climatiques ont une grande importance pour toute étude hydrogéologique car ils ont une influence sur le comportement hydraulique et surtout le bilan hydrique des aquifères.

Pour cette étude, les séries des données, qui sont à la base de la détermination de différents paramètres climatiques, ont été enregistrées à la station pluviométrique d'In-Salah.

La station est situé à l'aéroport s'éloignée 7km de la ville, ses coordonnées géographiques sont (tableau 1):

Tableau 1 : les coordonnées géographiques de la station d’In-Salah

Station	Coordonnées		Altitude
	Latitude (N)	Longitude (E)	
In-Salah	27°15'	02°31'	268 m

II-1-Analyse Climatique :**II-1-1Température En °C:**

C'est un facteur principal qui conditionne le climat de la région .L'analyse des températures sera faite à partir des données recueillies de station météorologique d’In-Salah période (1981-2012).

□ **Répartitions mensuelles des températures:**

Tableau 2 : températures mensuelles en °C pour la série de 32 ans (1981/ Station 2012). d’In-Salah (1981-2012) :

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	An
Tmoy	33,4	26,9	19,8	14,6	13,8	16,9	21,1	25,5	30,6	35,8	37,4	36,6	26,1
Tmax moy	40,7	34,7	27,5	22,2	21,5	24,9	28,8	33,3	38,3	43,3	45,1	44,3	33,7
Tmax abs	47,7	43,6	38	33,6	33,9	35,9	40	45,4	47,6	49	50,6	49,3	50,6
Tmin moy	26	19,9	13	7,8	6,9	9,5	13,1	17,2	22,3	27,5	29,5	29,1	18,5
Tmin abs	16,7	9,6	1,9	-1,7	-3	-2	1	3,1	10,4	14,6	22,1	22,8	-3
Moy-sais	Automne			Hiver			Printemps			Eté			26,1
	9,4			2,23			4,83			19,83			

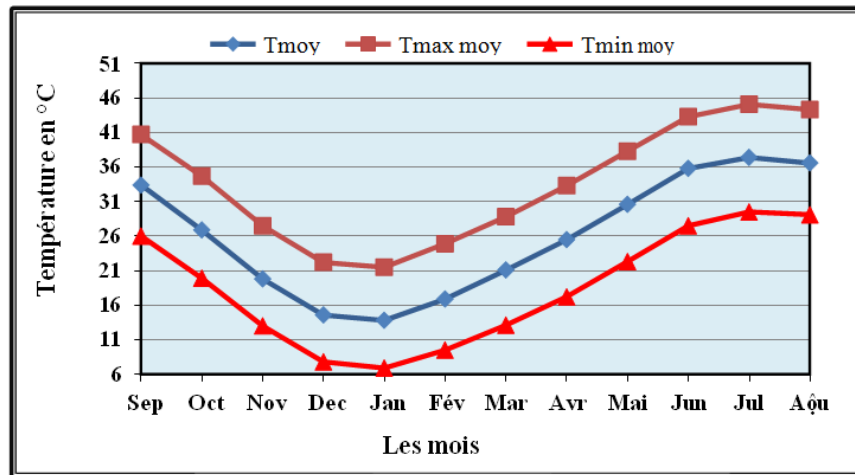


Fig. 03 : Températures moyennes mensuelles

Selon la Figure 3 de Variation des températures moyennes mensuelles on remarque un maximum de 33.4C° au mois de septembre puis décroît lentement jusqu'au mois de janvier (13.8C°) puis il y a un croisement lent jusqu'au le mois de juillet, la température est maximale (37.4 °C) jusqu'a août, après elle décroît très lente.

II-1-2-Vitesse Du Vent:

Nous pouvons dire que le vent c'est le paramètre climatique le plus régulier dans la région de In-Salah. Il est déterminé par sa direction et sa vitesse.

➤ Répartitions mensuelles des vents :

Tableau 3 : Vitesse des vents en mensuelles en m/s pour la série de 32 ans (1981/2012) :

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	An
Vmoy m/s	4.3	3.9	3.5	3.4	3.6	4.0	4.7	4.4	4.5	4.2	5.0	4.8	4.2
Moy-sais	Automne			Hiver			Printemps			Eté			4.2
	3.9			3.7			4.5			4.7			

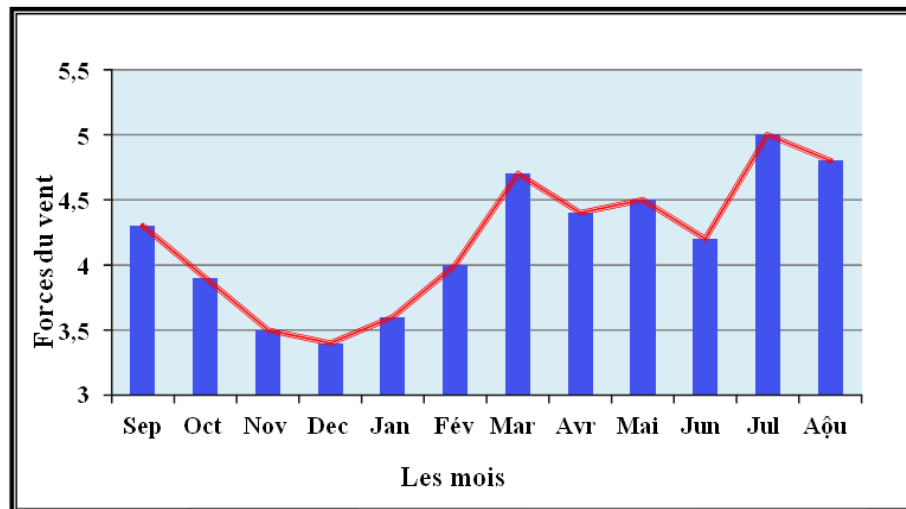


Fig.04 : Vitesse des vents moyens mensuels

L’histogramme représentant les répartitions mensuelles des vitesses des vents (fig.4) montra irrégularité de vitesse d’un mois à l’autre, la vitesse de vent varie de 3.4m/s à 5 m/s, le maximum est atteinte en Juillet de 5 m/s et un minimum de 3.4 m/s en Décembre la même remarque pour la vitesse de vent saisonnière, elle varie de 3.7 à 4.7 m/s.

Aussi on remarque qu’il n’y a pas une variation importante entre un mois et l’autre

II-1-3--Insolation:

Il s’agit de l’insolation effective c’est-à-dire de la période en heures durant laquelle le soleil a brillé.

➤ **Répartitions mensuelles des insolations :**

Tableau I-4 : insolation mensuelles en 1/10h pour la série de 32 ans (1981-2012) :

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	An
Inso/mois	276	278	258	259	268	258	282	290	316	307	340	327	289
Inso/Jour	9.2	9.0	8.6	8.4	8.6	9.2	9.1	9.7	10.2	10.2	11.0	10.5	9.5
Moy-sais	Automne			Hiver			Printemps			Eté			289
	271			262			296			325			

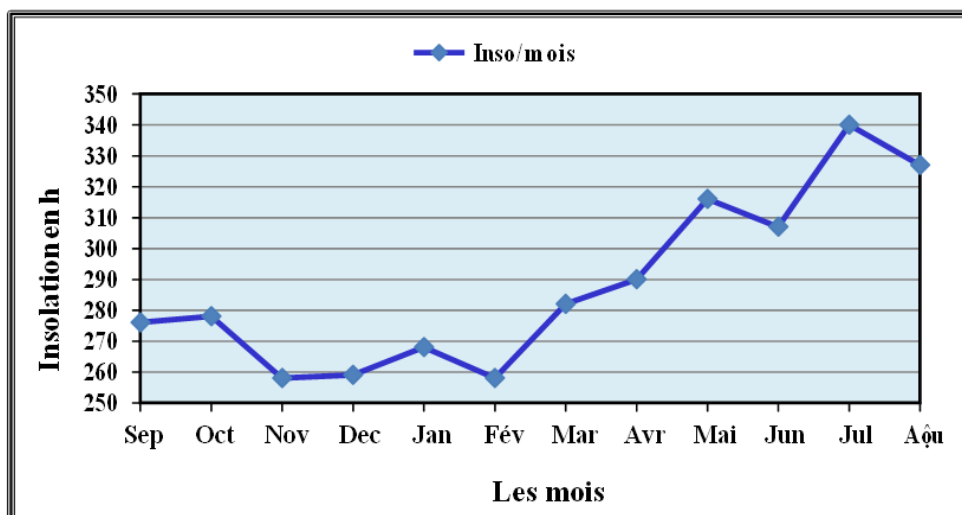


Fig. 05 : insolation moyennes mensuelles

La courbe de moyenne mensuelle (fig.05) de la série 32ans, (1981/2012) en station d’In-Salah, il irrégulier et plus fort entre 340-258, le mois le plus insolé est juillet de 340 et le mois de faible insolation est Février et Novembre de 358.

Notons que la répartition saisonnière des insolations, montre que la saison la plus insolée c’est l’Eté avec l’insolation annuelle de 325, et la saison de faible insolation c’est l’hiver avec l’insolation annuelle de 262 à la station d’In-Salah **BEN ALI** (2013)

II-1-4-Précipitation:

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental du climat saharien.

➤ Répartition mensuelle des précipitations :

Tableau 5 : Précipitations mensuelles en mm pour la série de 32 ans (1981/2012) :

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	An
RPmoy	0.4	1.6	1.5	2.6	3.1	2.0	1.2	1.3	0.4	0.1	0	0.6	1.3
RPmax	7.5	25.4	46.8	34.0	50.4	39.3	45.6	24.9	9.2	3.4	1.61	19.0	6
Année max	1925	1924	1934	1985	1928	1967	1953	1990	1990	1996	1998	1929	1990
Moy-sais	Automne			Hiver			Printemps			Eté			1.3
	1.2			2.6			1			0.3			

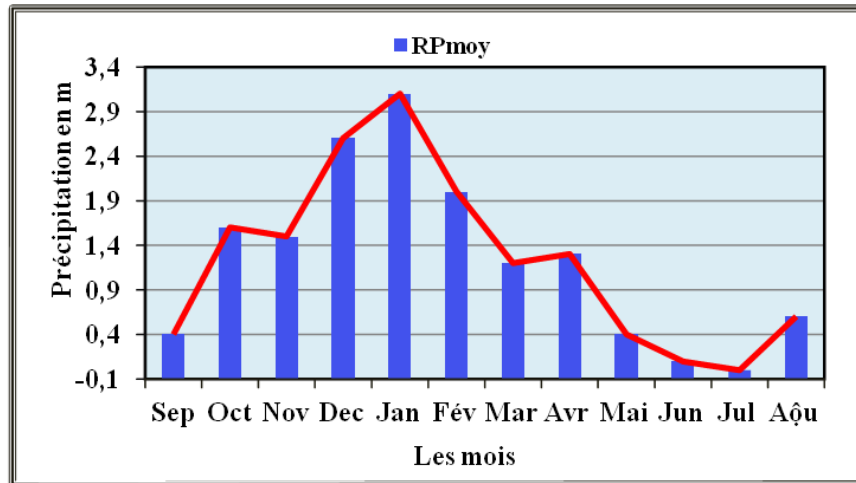


Fig.06: Précipitations moyennes mensuelles

L’histogramme (fig.06) représentant la répartition des pluies mensuelles sur une période de 32 ans a prouvée l’existence d’un régime mensuelle irrégulier traduisant une pluviométrie fort sur la station du bassin versant étudié, le maximum de ces précipitation est enregistré au mois de Janvier 3.1 mm, alors que le minimum est enregistré en Juillet 0 mm, pour une meilleur interprétation des résultats de changement pluviométrique moyenne mensuelle

II-2-Le Régime Hydrique :

II-2-1-Humidité:

Le degré hygrométrique de l’air (ou humidité relative) c’est le rapport de la tension de vapeur effective à la tension de vapeur saturante dans les mêmes conditions de température et de pression.

Nous avons indiqué dans le tableau ci-dessous la moyenne mensuelle de l’humidité mesurée à In-Salah (période 1981 - 2012).

➤ **Répartitions mensuelles des humidités :**

Tableau-06 : humidité relative mensuelles en mm pour la série de 32 ans (1981/2012) :

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	An
Humidmoy	22	30	38	43	42	35	28	24	20	18	15	17	28
Moy-sais	Automne			Hiver			Printemps			Été			
	30			40			24			17			

La période humidité (les mois plus humidité et les mois plus sèche), les mois plus humidités Septembre, Octobre, Novembre, Décembre, Janvier et Février, et les mois plus sèches sont Mars, Avril, Mai, Juin et Juillet. Or l'humidité saisonnier nous remarquons l'automne et l'hiver est humidité presque de 30,40 et Le printemps de 24, et L'été de 17 c'est-à-dire L'automne et L'hiver sont la saison le plus humidité or le saison L'printemps et L'été sont plus sèche.

II-2-2-L'évaporation et l'évapotranspiration :

Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, etc.), soit le plus souvent à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration.

Pour l'évaporation, la quantité d'eau qui repart dans l'atmosphère dépend uniquement des paramètres physiques tels que la température de l'air, de l'eau, de la vitesse du vent, du degré hygrométrique, de l'ensoleillement, etc. **BEN ALI** (2013)

II-2-3-a-L'évaporation :

Tableau -07 : représente les moyennes mensuelles de l'évaporation en (mm) pendant les périodes de (1981-2013):

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	An
Evap/mois	418	328	211	166	171	201	299	344	425	484	551	523	344
Evap/Jour	13.9	10.6	7.0	5.4	5.5	7.2	9.6	11.5	13.7	13.7	16.1	17.8	11.3
Moy-sais	Automne			Hiver			Printemps			Eté			344
	319			180			356			520			

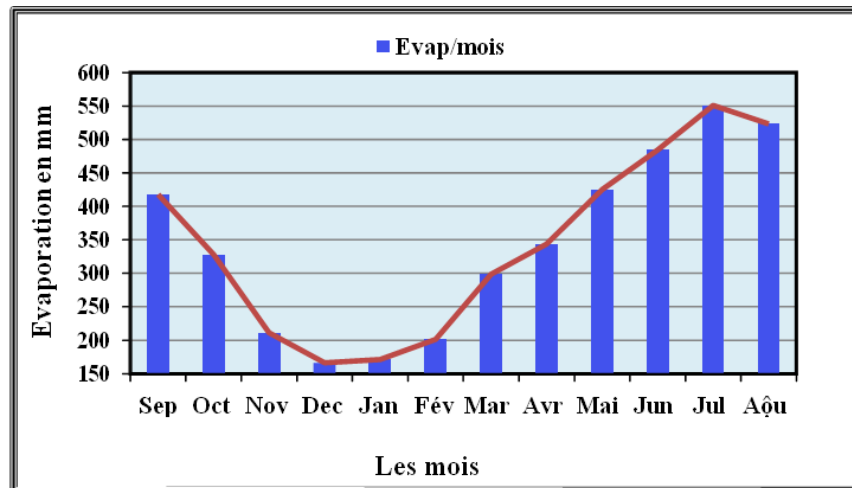


Fig.07 : Evaporation moyennes mensuelle

➤ **Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN :**

Les histogrammes représentant les répartitions mensuelle des évaporations (fig.07) montre une irrégularité des évaporations d’un mois à l’autre, le mois plus évaporé est juillet de 551 mm, et le mois de faible évaporation est Décembre, Janvier de 166 mm, 171mm.

Selon la définition de Gausсен, une période sèche est une période pendant la quelle les précipitations totales du mois sont inférieures ou égales au double de la température du même mois. Ce diagramme montre que pour un climat de notre région (climat saharien), il n'existe pas de période humide, (Fig.07).

Tableau 8 : présente la précipitation annuelle et température annuelle (1981-2012) :

Mois	jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sép	Oct	Nov	Déc	An
Précipitation (mm)	0.4	1.6	1.5	2.6	3.1	2.0	1.2	1.3	0.4	0.1	0	0.6	1.3
Températur (C°)	13.8	16.9	21.1	25.5	30.6	35.8	37.4	36.6	33.4	26.9	19.8	14.6	26.1

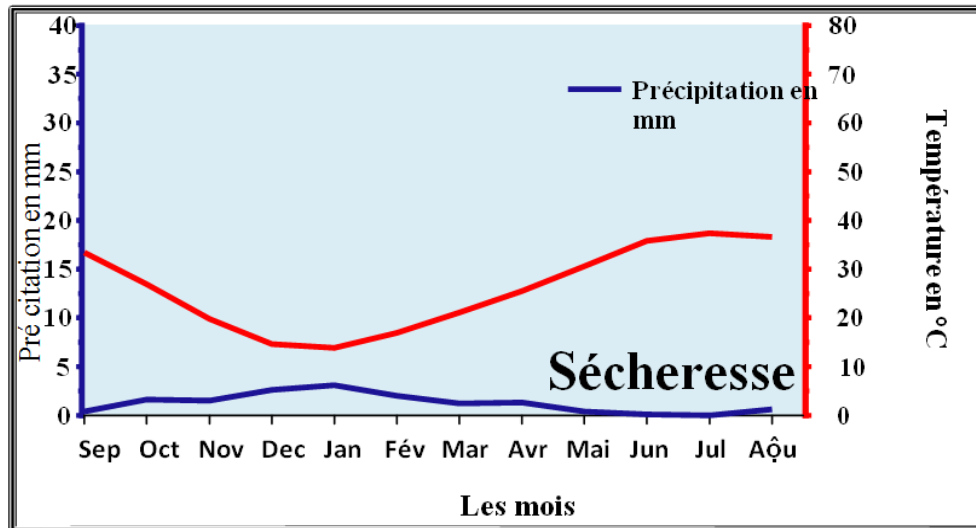


Fig.08: Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN de la région d'In-Salah

II-2-4-b-L'évapotranspiration

-Calcul de l'évapotranspiration :

C'est la comptabilisation entre les sorties et les entrées des eaux de précipitation.

L'évapotranspiration résulte de deux phénomènes : l'une physique « évaporation » et l'autre biologique « transpiration », ce phénomène important du cycle hydrologique est fonction de plusieurs facteurs : (humidité, température, l'insolation, couvert végétal...). La méthode adoptée pour les calculs de l'évapotranspiration est celle de THORNTHWAITE.

Le climat de la région d'In Salah est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures très élevées d'autre part. Cette aridité ne se constate pas seulement en fonction du manque de pluies, mais aussi par une forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région. Dans la région d'étude la Période sèches qui caractérisé mon climat.

L'exploitation des données disponibles a permis d'établir un bilan hydrologique global semble refléter convenablement le phénomène de la remontée des eaux. Ce sont les eaux d'irrigation mal drainées qui favorisent l'élévation du niveau d'eau dans la nappe phréatique. **BEN ALI** (2013)

III-Hydrogéologie :

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye.

Ce bassin renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

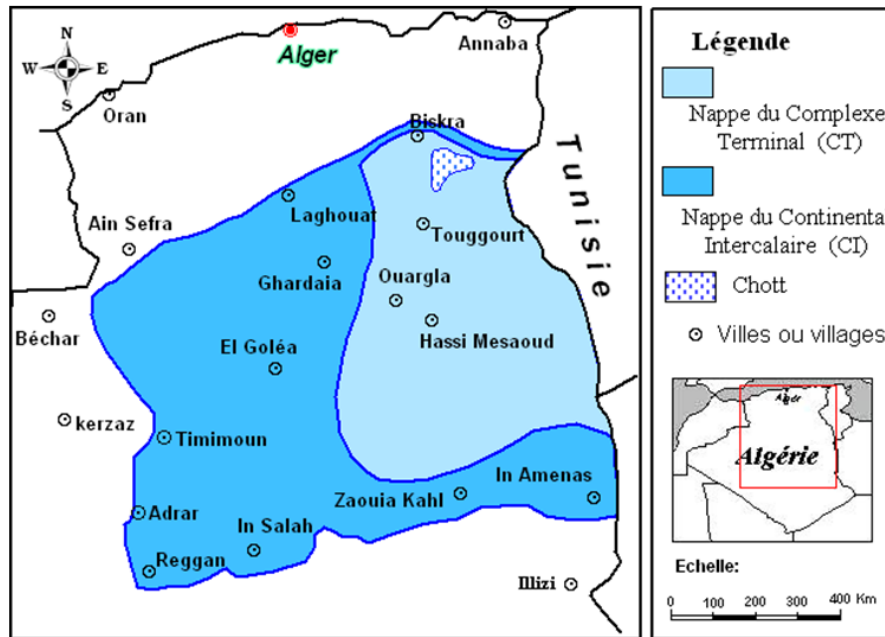


Fig.09: Carte des ressources en eau souterraines (Continental Intercalaire et Complexe Terminal)

III-1-Système aquifère locale :

L'ensemble géologique qui renferme la nappe d'eau dans la région d'In-Salah est constitué par une alternance des formations détritiques continentales.

Au nord de la région d'In-Salah les formations aquifères débutent par des matériaux grossiers (alluvion) du quaternaire qui surmontent une épaisse couche (305 m) constituée de grés argile, gravier et sable du crétacé inférieur.

Où centre de la région d'In Salah on remarque un changement du faciès lithologique, ainsi qu'une réduction de l'épaisseur. La formation dominante est le gré tendre et l'argile rouge sableuse. Vers le sud est le pourcentage des matériaux fins devient plus important et l'argile rouge sableuse constitue la formation la plus dominante, l'épaisseur de la nappe d'eau dans cette zone ne dépasse guère 50 m. La géométrie de l'aquifère :

Le toit du substratum du primaire montre dans l'ensemble un prolongement du mur du réservoir utile du sud vers nord, le pendage du toit du substratum primaire est atteindre son profondeur maximum qui est de l'ordre de 600 m. La profondeur minimum se localise le long des affleurements de la formation carbonifère et ne dépasse guère le 50 m.

L'allure des courbes isobathes montre que l'ensemble géologique dans la région constitue un synclinale et son axe est orienté NNW – SSE

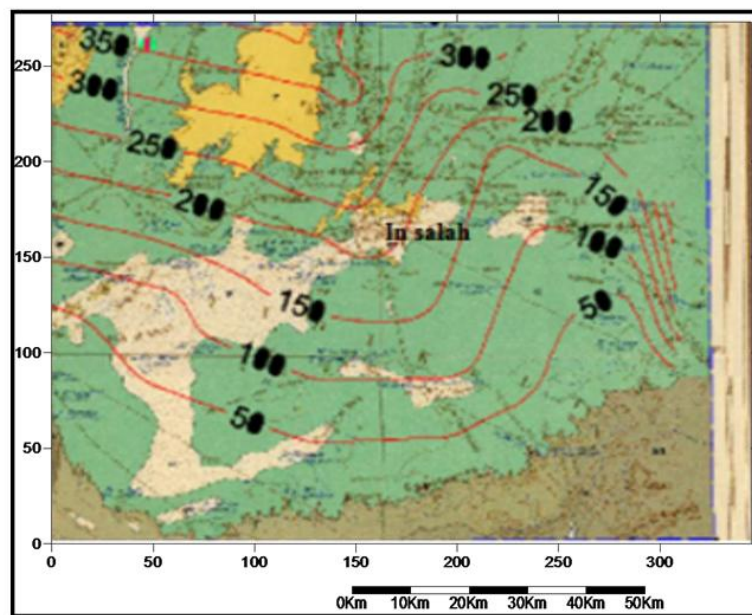


Fig-10: carte isobathe d'In-salah (ANRH Adrar)

III-2-Puissance du réservoir du CI:(figure 11,12) :

La variation de l'épaisseur dans cette région : l'épaisseur maximum se localise au nord et oscille entre 305 à 400 m.

Dans la partie sud de la zone est qui constitue la limite de la formation aquifère, L'épaisseur devient moins importante et ne dépasse pas 50 m.

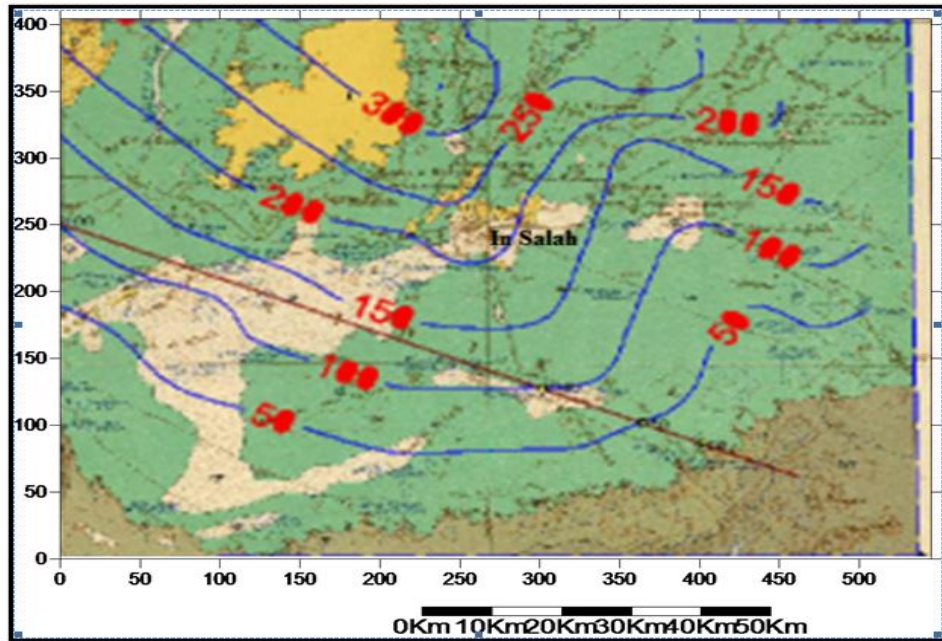


Fig-11: Carte isobathe continentale intercalaire de la région d’In-Salah

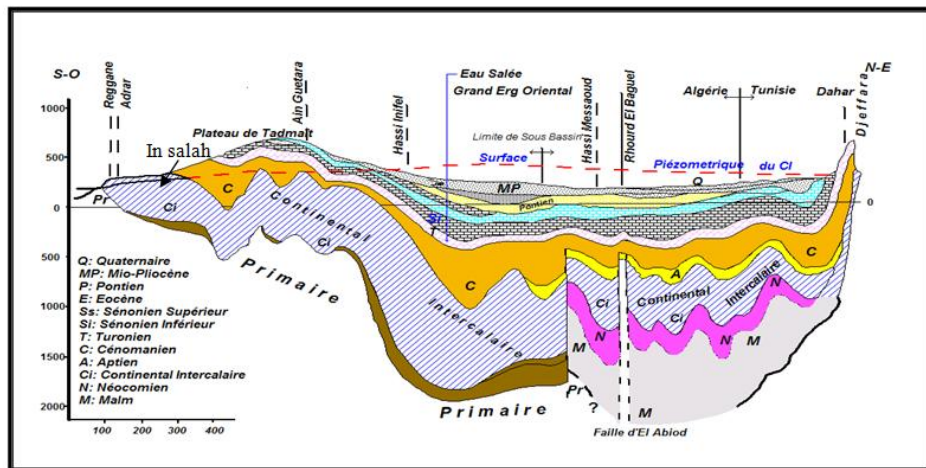


Fig-12: Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrional

III-3-Potentialité en eau :

La région d’In Salah renferme 120 forages hydrauliques captent la nappe du CI.ces forages sont repartis comme suite:

III-3-1-Les forages d’AEP :

La situation actuelle des ces forages est résumée dans le tableau ci-dessous **BEN ALI (2013)**

Tableau-9 : Les forages d'AEP d'In-Salah

Region	Nombre totale	Forage exploité	Forage non exploité
In-Salah	16	12	2

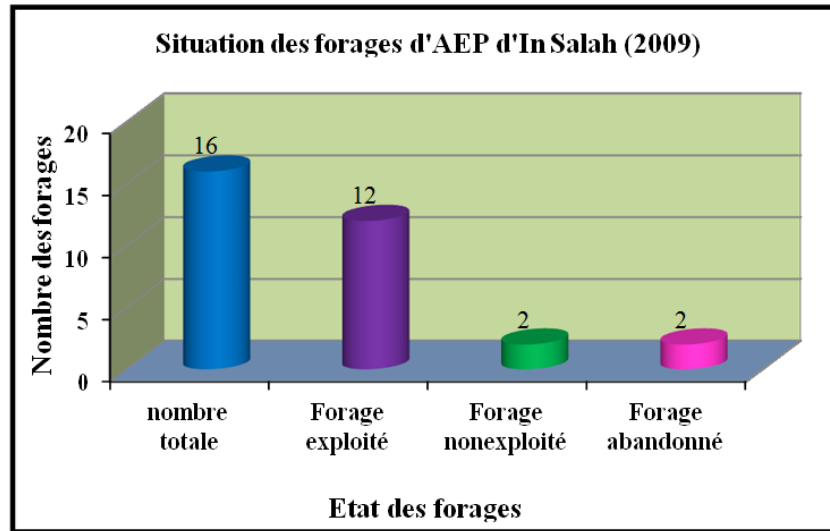


Fig-13:Situation des forages d'AEP d'In-Salah

III-3-2-Forage d'irrigation :

La situation des ces forages est illustrée dans le tableau suivant : **BEN ALI (2013)**

Tableau-10: Les forages d'irrigation d'In-Salah

région	Nombre totale	Forage exploité	Forage non exploité
In-Salah	104	47	49

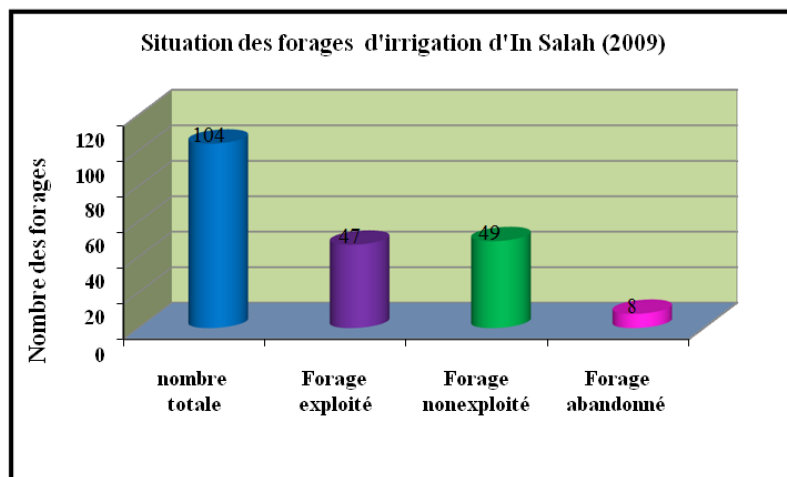


Fig-14:Situation des forages d'irrigation d'In-Salah

Conclusion:

Sur le plan hydrogéologique on dispose de peu d'information sur les potentialités des formations susceptibles d'être aquifères. Tous les forages recensés captent les formations du Continental Intercalaire. La profondeur des forages varie entre (160 à 250).

En générale, les forages réalisés dans cette région ont mis en évidence des terrains constitués dans l'ensemble, de grès quartzeux, d'argile, d'argile sableuse, de grès parfois roses de sable, de marnes parfois rouges et de grès sableux.

Chapitre II

Matériel et Méthodes

Introduction :

L'échantillonnage d'une eau comprend la préparation du prélèvement, le prélèvement proprement dit, le conditionnement de l'échantillon, ainsi que son stockage jusqu'au moment où l'eau est analysée. Chacune de ces étapes est importante pour assurer la fiabilité des résultats d'analyses. **M. MIOURIGH**(2011)

I. Zone d'échantillonnage

Vu le nombre important de puits que compte la région d'étude, et étant confronté à l'impossibilité d'analyser les eaux de l'ensemble de ces forages, nous avons procédé à la sélection de 46 forages répartis uniformément à travers la région d'In-Salah centre jusqu'a IGOSTEN , pour prélever l'eau de la nappe souterraine . A l'aide d'un GPS, ils ont déterminé les coordonnées UTM des forages d'eau existants.

I.1. Choix des points de prélèvement

Pour une bonne représentativité des échantillons, nous avons choisi les forages de prélèvement selon les critères suivants :

- Une bonne répartition spatiale des forages
- L'utilisation pour l'eau potable ou pour l'irrigation
- L'accessibilité aux points d'eau à prélever.

**Photo****1: Forage (41) Albien –Chada (In-Salah)**



Photo 2 : Forage (43) Albien –Lafgaiguira (In-Salah)



Photo 3 : Forage (44) Albien- El-Mansoura (In-Salah)

I.2. Exécution des prélèvements

Après le choix des points de prélèvement, il est nécessaire d'ouvrir le robinet suffisamment pour renouveler l'eau contenue dans le tubage jusqu'à ce qu'elle devienne représentative de la portion d'aquifère que l'on veut échantillonner.

Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des flacons propres, rincés avec l'eau distillée puis avec l'eau à analyser. Après la mise en flacon des échantillons, les flacons doivent être fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon.

Les flacons doivent être clairement identifiés à l'aide d'étiquettes indiquant le numéro de l'échantillon

I.3. Stockage des échantillons

Toutes les eaux sont susceptibles de se modifier plus ou moins rapidement par suite des réactions physiques, chimiques ou biologiques qui peuvent avoir lieu dans le flacon dans le laps de temps qui sépare le prélèvement de l'analyse.

Pour cela, il faut apporter les échantillons au laboratoire d'analyses dès que possible (délai inférieur à 24 heures). La température de l'échantillon ne doit jamais dépasser celle de l'eau souterraine prélevée. Les flacons doivent être stockés à l'abri de la lumière et au frais (glacière ou réfrigérateur).

Au laboratoire, les échantillons doivent être conservés au réfrigérateur entre 3 et 5°C (Thierrin et al, 2001).

I.4. Mesures in situ

Les mesures de terrain concernent, la conductivité électrique et la température. En effet, nous avons consulté un certain nombre de questions sur la qualité de l'eau, qui a été fait par la société SEDAT aux consommateurs des forages.

Ils ont mesuré la conductivité électrique et la température à l'aide d'un conductimètre de terrain (**Photo 4**). . **M. MIOURIGH(2011)**



Photo 4 : Conductimètre de terrain $\mu\text{S}/\text{cm}$

I. 5. Mesures et analyses au laboratoire

Les analyses chimiques sont effectuées au niveau du laboratoire de l'ANRH (Agence nationale des ressources en eaux) d'Ouargla

- Cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} et K^{+} ;
- Anions: Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} et NO_3^{-} .
- La conductivité électrique (CE) à 25°C et le résidu sec (RS).

Les résultats des analyses chimiques d'une eau doivent être impérativement soumis à un test de validité qui consiste au calcul de la déviation relative entre la somme des cations et la somme des anions.

Ce paramètre permet de vérifier la précision des méthodes analytiques utilisées et la validité des déterminations chimiques. S'il est inférieur à 5% les analyses sont considérées comme correctes, lorsque sa valeur est comprise entre 5% et 10%, les analyses peuvent être à la rigueur retenues. Par contre au delà de 10% les analyses doivent être refaites.

I.5.1. Dosage du calcium et du magnésium

Les dosages du calcium et du magnésium ont été réalisés par complexométrie.

Principe

Le sel disodique de l'acide Ethylène Diamino Tétra Acétique (EDTA) cristallisé avec

H₂O, appelé aussi complexon ou versénate forme avec un nombre de cation des complexes dont la stabilité dépend essentiellement du pH

I.5.2. Dosage du sodium et du potassium

Les dosages du sodium et du potassium ont été faits par spectrophotomètre de flamme(Photo 5).

Principe

Les ions en solution sont portés, au moyen d'une flamme de température convenable à un niveau énergétique supérieur à la normale (on dit que les atomes sont excités par la flamme). Libérés de la flamme, ils restituent l'énergie acquise en émettant une radiation caractéristique de l'élément. On pulvérise donc au moyen d'un gicleur, la solution à doser dans une flamme de température déterminée par l'élément que l'on recherche. On sélectionne la radiation attendue au moyen d'un filtre. L'intensité de la radiation est proportionnelle à la concentration de l'élément présent dans la solution. On établit donc une gamme étalon pour chaque élément dosé et l'on s'y réfère pour déterminer une concentration inconnue.

I.5.3. Dosage des chlorures

Les chlorures en présence du thiocyanate mercurique et de l'alun ferrique donnent en milieu nitrique acide un complexe colore orange susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde de 470 nm.

La courbe d'étalonnage donne directement la teneur en chlorures en mg/l.

I.5.4. Dosage des sulfates

Les sulfates sont précipités sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum. Le précipité ainsi obtenu, très fin est stabilisé par la gélatine. On effectue sur le trouble une mesure turbidimétrique à la longueur d'onde de 495 nm.

La courbe d'étalonnage donne directement la teneur en sulfates exprimés en mg/l.

I.5.5. Dosage des bicarbonates

L'ion bicarbonate réagit avec un acide minéral et libère du gaz carbonique dans la solution (Rodier, 2009).

I.5.6. Dosage des nitrates

Le dosage des nitrates se fait par colorimétrie dans un photomètre UV 440 μ m avec le réactif sulfophérique (Rodier, 2009).

Les photos 05, 06,07 et 08 indiquent le matériel utilisé au laboratoire



Photo 05 : Spectrophotomètre de flamme mg/L



Photo 06 : L'étuve



Photo 07 : Dessiccateur



Photo 08 : Conductimètre de paillasse Mg/L

Les résultats d'analyses des forages étudiés de la région de In salah (SEDAT 2011)

Libellé	Group	T°C			c25°C	Ca	Mg	Na	K	HCO3-	Cl	SO4	PO4	NO2	NO3	SiO2	NH4	TAC	
IN-SALAH (Centre)	1	25	F1	444638,74	3006710,87	3,683	239,6	94,3	470	30	201	750	600	0,003	0,025	10,5	5	0,03	16,5
IN-SALAH (Centre)	1	25	F2	451576,24	3014620,17	2,665	217	92,16	440	30	183	750	550	0,03	0,03	12	56	0,4	15
IN-SALAH (Centre)	1	25	F3	454802,41	3017038,7	3,338	198	111	470	28	201	750	775	0	0	13	50	0,05	16,5
IN-SALAH (Centre)	1	25	F4	458843,74	3016993,83	3,126	198	109	470	28	180	750	600	0	0	12	52	0,05	15
IN-SALAH (Centre)	1	25	F5	449950,81	3007057,56	3,577	224	100	300	20	189	780	400	0,002	0	5	48	0	15,5
IN-SALAH (Centre)	1	25	F6	449624	3007889,63	3,858	145	145,5	420	20	189	820	650	0,086	0,017	12	42	0	15,5
IN-SALAH (Centre)	1	25	F7	450147	3007949,05	3,679	228	91	420	20	198	780	550	0,09	0,021	14	33,8	0,05	16
IN-SALAH (Centre)	1	25	F8	439243,17	3006243,78	3,224	219,6	100	420	22	189	750	700	0,002	0,025	12	46	0,07	15,5
IN-SALAH (Centre)	1	25	F9	447389,17	3006422	3,742	229	86	400	20	186	800	650	0,008	0,001	27	26,8	0	15,25
IN-SALAH (Centre)	1	25	F10	447886,92	3007004,51	3,58	268	113	470	23	192	1000	390	0	0,095	0	26	0,03	15,75
IN-SALAH (Centre)	1	25	F11	447200,34	3007315,09	3,68	242	83	300	22	204	500	740	0	0,004	3	29	0,03	16,75
IN-SALAH (Centre)	1	25	F12	447532,47	3007775,21	3,663	229	76	400	20	183	800	500	0	0,006	14	29,4	0	15
IN-SALAH (Centre)	1	25	F13	447119,5	3007715,43	3,954	228	78	400	22	174	750	600	0,025	0,002	12	34	0,09	14
IN-SALAH (Centre)	1	25	F14	446268,71	3008211,38	3,063	237	78	420	20	189	850	400	0,098	0,006	13	30	0	15,5
IN-SALAH (Centre)	1	25	F15	445918,82	3009997,49	3,491	228,5	91	420	21	192	1000	300	0	0	9	0	0	0
IN-SALAH (Centre)	1	25	F16	445391,82	3009015,19	3,503	230	96,7	500	30	192	875	670	0,006	0	10,5	32	0	15,75
IN-SALAH (Centre)	1	25	F17	444287,1	3008066,27	3,533	250	65	370	20	168	750	500	0,08	0,086	15	30	0,01	14
IN-SALAH (Centre)	1	25	F18	444946,46	3007847,95	3,682	239	59,4	380	20	164,7	500	710	0,011	0	33	26	0	13,5
IN-SALAH (Centre)	1	25	F19	444061,32	3006805,76	4,016	213	90	200	30	171	500	500	0,42	0	10,5	29	0,01	14
IN-SALAH (Centre)	1	25	F20	443974,05	3005760,02	3,348	246	93	470	42	186	1000	575	0,003	0,022	10	33,9	0	15
IN-SALAH (Centre)	1	25	F21	452573,44	3009324,13	3,136	237	88	470	38	180	800	575	0	0,009	12	33,9	0	15
IN-SALAH (Centre)	1	25	F22	446797,91	3009716,77	2,626	177,6	81,4	370	45	137,3	560	750	0	0	18	34,8	0	11,25
IN-SALAH (Centre)	1	25	F23	450256,2	3014594,64	3,309	126	70,2	530	30	73,2	750	500	0	0,01	0	28,2	0,05	6
IN-SALAH (Centre)	1	25	F24	448971,77	3016538,3	3,263	228	93	520	42	128	800	910	0,007	0,012	12	32,5	0,02	10,5
SAHLA-EST	2	25	F25	449113,67	3017614,63	3,287	187	98	200	20	171	500	550	0,009	0,003	28	37	0	14
SAHLA-EST	2	25	F26	450738,86	3018408,04	2,983	193	87	412	33	171	500	850	0	0	12	38,5	0,01	14
SAHLA-EST	2	25	F27	449980,85	3021303,36	3,445	211	84	415	34	165	500	875	0	0,001	28,5	30	0,04	13,5
SAHLA-EST	2	25	F28	449432,94	3021736,36	3,697	198	90	350	36	146	500	688	0	0,004	38	33,9	0,01	11,5
SAHLA-EST	2	25	F29	443547,47	3008777,29	4,108	215	74	330	33	140	600	625	0,003	0,012	45	32,5	0	12
SAHLA-EST	2	25	F30	444513,81	3009542,16	3,749	210	72	330	34	140	500	700	0,007	0,005	40	31,2	0,04	11,5
SAHLA-EST	2	25	F31	441817,35	3015308,33	3,399	217	80	420	20	159	500	800	0,011	0,032	33,5	33,3	0,02	13
SAHLA-OUEST	3	25	F32	453836,03	3015934,59	3,39	153,6	110,6	415	20	150	500	775	0,025	0,065	41,5	34,9	0	12
SAHLA-OUEST	3	25	F33	452799,54	3018123,08	3,093	219,6	73,4	412	20	146,4	500	800	0,02	0,025	41,5	35,2	0	12,25
SAHLA-OUEST	3	25	F34	453044,74	3017537,54	3,151	215	71	350	20	150	400	780	0,01	0,024	42	42	0	12,25
SAHLA-OUEST	3	25	F35	453345,41	3017074,87	3,041	288,4	73	410	20	138	500	900	0,025	0	40	32,4	0	11,25
SAHLA-OUEST	3	25	F36	459751,6	3017175,45	3,109	232	78	450	88	188	500	1000	0,008	0,006	39	33,3	0,02	11,5
SAHLA-OUEST	3	25	F37	459971,54	3017174,74	2,918	219,6	81	430	20	177	500	836	0,002	0,018	31	34,3	0	14,5
SAHLA-OUEST	3	25	F38	459396,93	3018007,36	3,262	206	84	410	20	155	600	690	0,004	0,003	35	37,3	0,02	12,75
SAHLA-OUEST	3	25	F39	463924,07	3014978,04	2,872	224	78	410	38	159	600	725	0,01	0,01	12	32,4	0	13
HASSI LAHDJER	4	25	F40	464501,33	3014914,83	3,09	215	83,5	350	40	165	500	675	0,007	0	41,5	32,6	0,03	13,5
HASSI LAHDJER	4	25	F41	468179,16	3012258,79	2,573	212	76,5	320	31	150	400	750	0,007	0,009	41,5	34,9	0	12
HASSI LAHDJER	4	25	F42	423595,9	3007991,73	3,24	206	86	360	38	158,6	500	850	0,01	0	21,7	34,5	0,01	13
HASSI LAHDJER	4	25	F43	435421,17	3012109,23	3,451	189	107	325	33	159	600	575	0,005	0,055	35	31	0,05	13
IGOSTEN	5	25	F44	451673,4	3018373,58	3,376	193	72	320	30	158,6	400	724	0	0,017	48	34,7	0	13
IGOSTEN	5	25	F45	451261,65	3018529,04	3,351	202	81,6	320	33	152,5	500	750	0,007	0,008	43	34,8	0,01	12,5
IGOSTEN	5	25	F46	445290,41	3017200,17	4,124	145	64	300	24	155,5	300	700	0,008	0,002	65	34,3	0,01	13

II. Outils d'analyse des données

Pour interpréter les résultats d'analyses, nous avons utilisé les logiciels suivants :

II.1. Logiciel d'Hydrochimie d'Avignon (L.H.A.)

Nous avons utilisé le logiciel d'hydrochimie d'Avignon (version 4, 2008) (Figure 15), qui nous permet de classer les eaux en faciès chimique et en classe d'eau potable et d'irrigation, et de construire en particulier les diagrammes de Piper, de Schoeller-Berkaloff et de Riverside. **M. MIOURIGH(2011)**

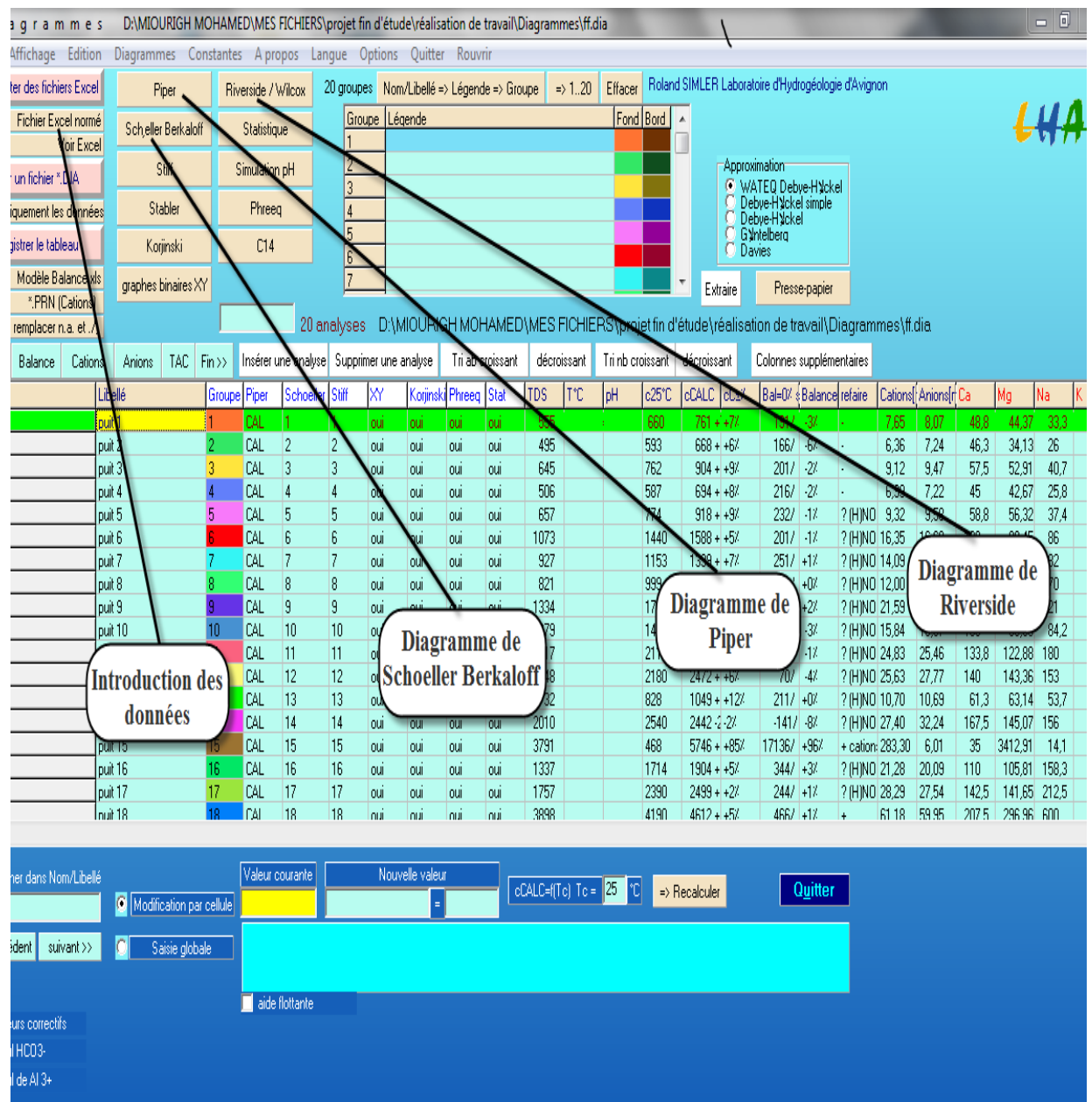


Figure 15 : Représentation de l'interface du logiciel d'hydrochimie

II.2. Logiciel XLSTAT

Le logiciel XLSTAT (Addinsoft, 2013) permet de faire l'analyse en composantes principales (A.C.P). Il donne des résultats complets et il donne les corrélations entre les variables et il établit les cercles de corrélation. . M. MIOURIGH(2011)

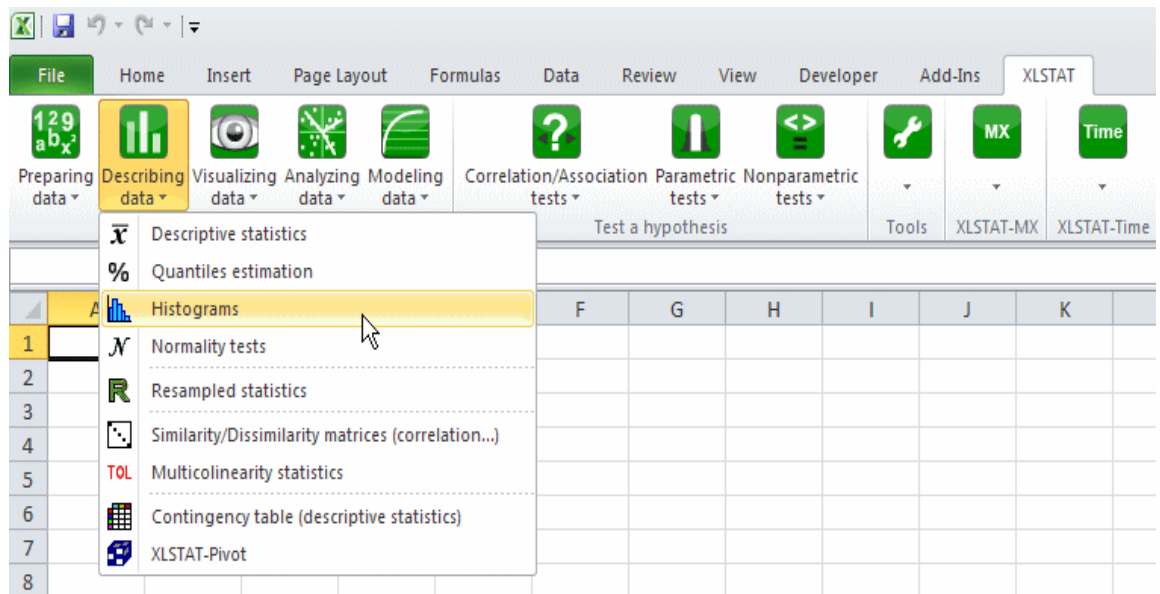


Figure 15 : Représentation de l'interface du logiciel XLSTAT

Chapitre III
Interprétation des données
Hydro-chimiques

Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques d'échantillons d'eau prélevé au niveau de la nappe souterraine d'In-Salah. Les prélèvements sont faits sur cinquante des forages en période de hautes eaux (mars 2011) Les paramètres physico-chimiques mesurés sont la conductivité électrique, la température et les éléments chimiques dosés ont porté essentiellement sur les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-).

Le but de cette étude hydrochimique est de déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux et des éléments dissous afin de déterminer leurs origines, définir les faciès chimiques des eaux souterraines, de les comparer et de suivre leur évolution dans l'espace. Il sera également étudié la qualité des eaux souterraines vis-à-vis de la potabilité et leur aptitude à l'irrigation.

Pour cela, un certain nombre de cartes et de diagrammes ont été élaborés et qui serviront de base pour l'interprétation générale des résultats de mesures des paramètres physico-chimiques et d'analyses chimiques.

- **Echantillons représentatif**

À l'aide de logiciel d'hydrochimie d'Avignon nous avons travaillé sur 46 forages représentatifs parmi 53 forages qui à été échantillonné

Les hypothèses d'éliminations sont:

- 1- La balance ionique dépasse 5% marge acceptable par les normes d'analyse des eaux (Rodier 2009)
- 2- Mauvaise emplacement spatial qui peut être erroné la variation spatiale des éléments

I. Classification chimiques des eaux souterraines

I.1. Classification des eaux souterraines selon PIPER

Le diagramme de Piper est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations respectivement, et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs.

Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques (Figure 16).

La représentation des résultats chimiques des eaux prélevées de nappe souterraine d'In-Salah sur le diagramme de Piper montre que (Figure 17) :

- le chimisme des eaux analysées est caractérisé par le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien avec une légère tendance de migration vers le faciès chlorurée sodique
- pas de cation dominant pour 54% des échantillons analysés tend que le reste migré vers le sodium potassium
- le chlorure est l'anion dominant pour la majorité des eaux analysées, il n'y a pas d'anion dominant pour les échantillons (F2, F14, F21, F23, F25, F31, F36, F44) qui signifiera 17% des échantillons, le sulfate est l'anion dominant pour les échantillons (F27, F28, F37, F38, F39, F41) qui signifiera 13%.. **M. MIOURIGH**(2011)

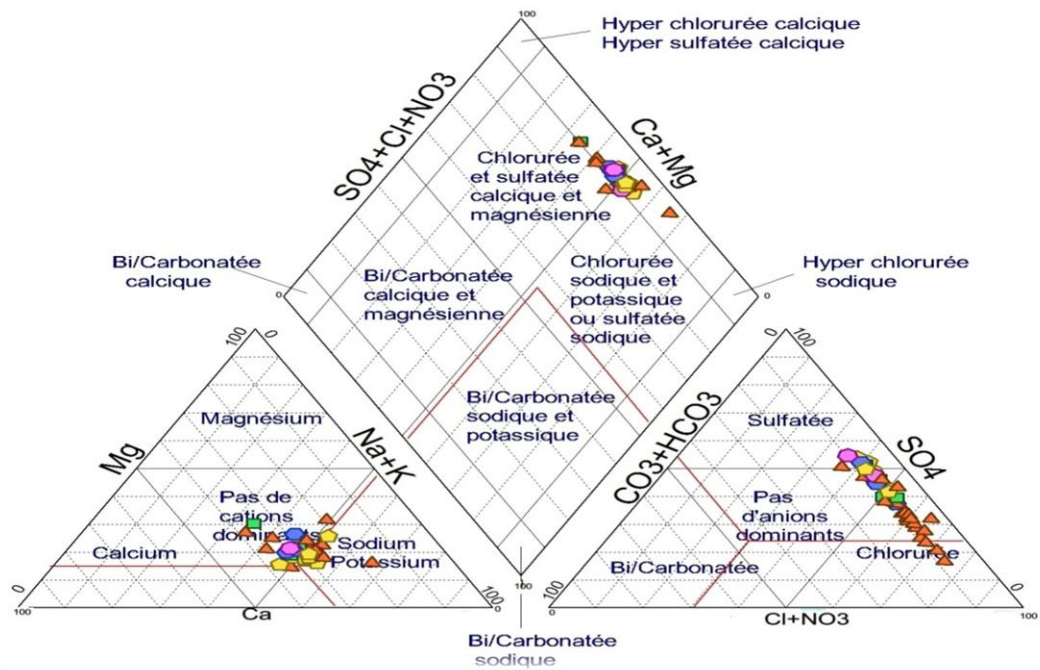


Figure 16 : Représentation du diagramme de Piper

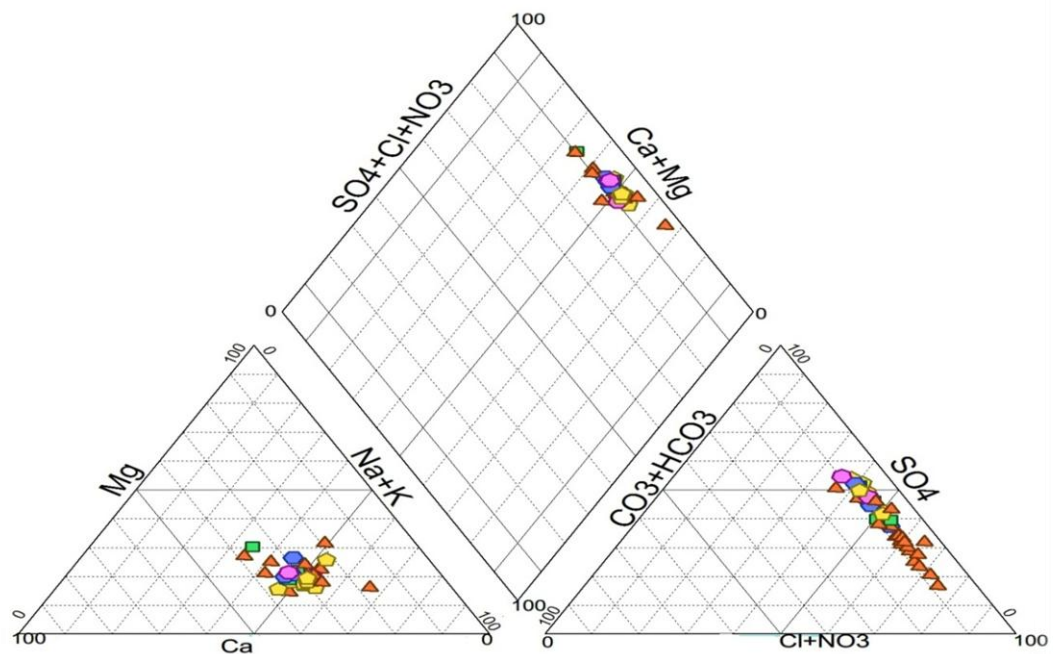


Figure 17 : Représentation des eaux souterraines sur le diagramme de PIPER

I.2. Classification des eaux souterraines selon Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée.

La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique.

La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques.

Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

Les Figures 18 ; 19 ; 20 et 21 montrent les faciès chimiques des échantillons analysés selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff qui sont les suivants :

- Eau à faciès chlouré sulfaté sodi-potassique ($\text{Na}+\text{k},\text{CL}$) pour les échantillons (F4,F8,F9,F10,F11,F12,F13,F14,F16,F17,F18,F19,F20,F23,F29,F30,F43,F46) qui présente 61% des échantillons ;
- Eau à faciès sodi-potassique ($\text{Na}+\text{k}$) concerne tout les échantillons (F1-F46) soft F2, F22 avec 96% points testés ;
- Eau à faciès sulfaté- sodi-potassique ($\text{SO}_4\text{-Na}+\text{K}$) concerne les échantillons (F2,F5,F19,F20,F27,F29,F30,F31,F32,F33,F37,F42,F44,F45,F46) correspondant à 67% des échantillons. . **M. MIOURIGH**(2011)

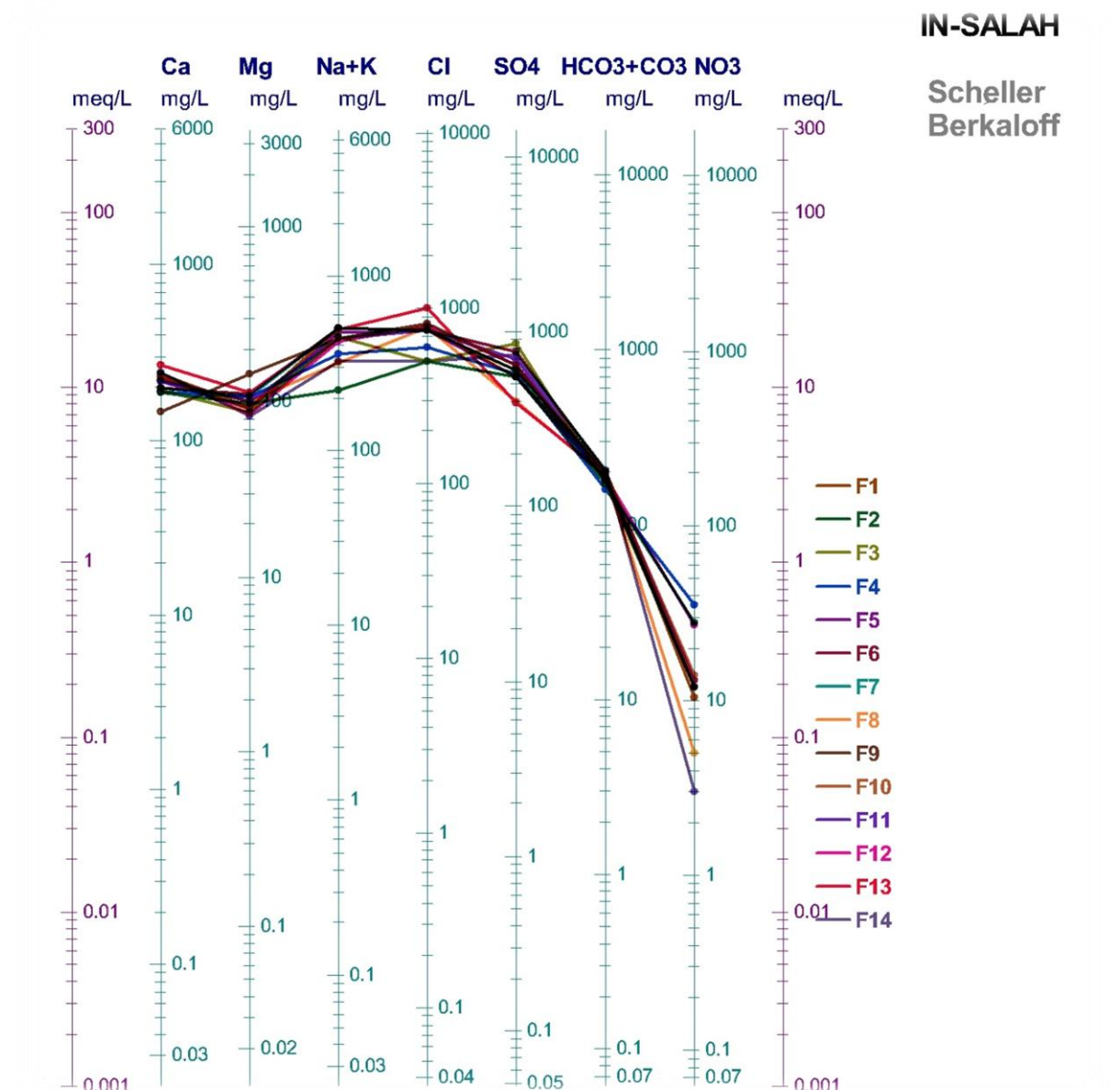


Figure 18 : Représentation des résultats d’analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff

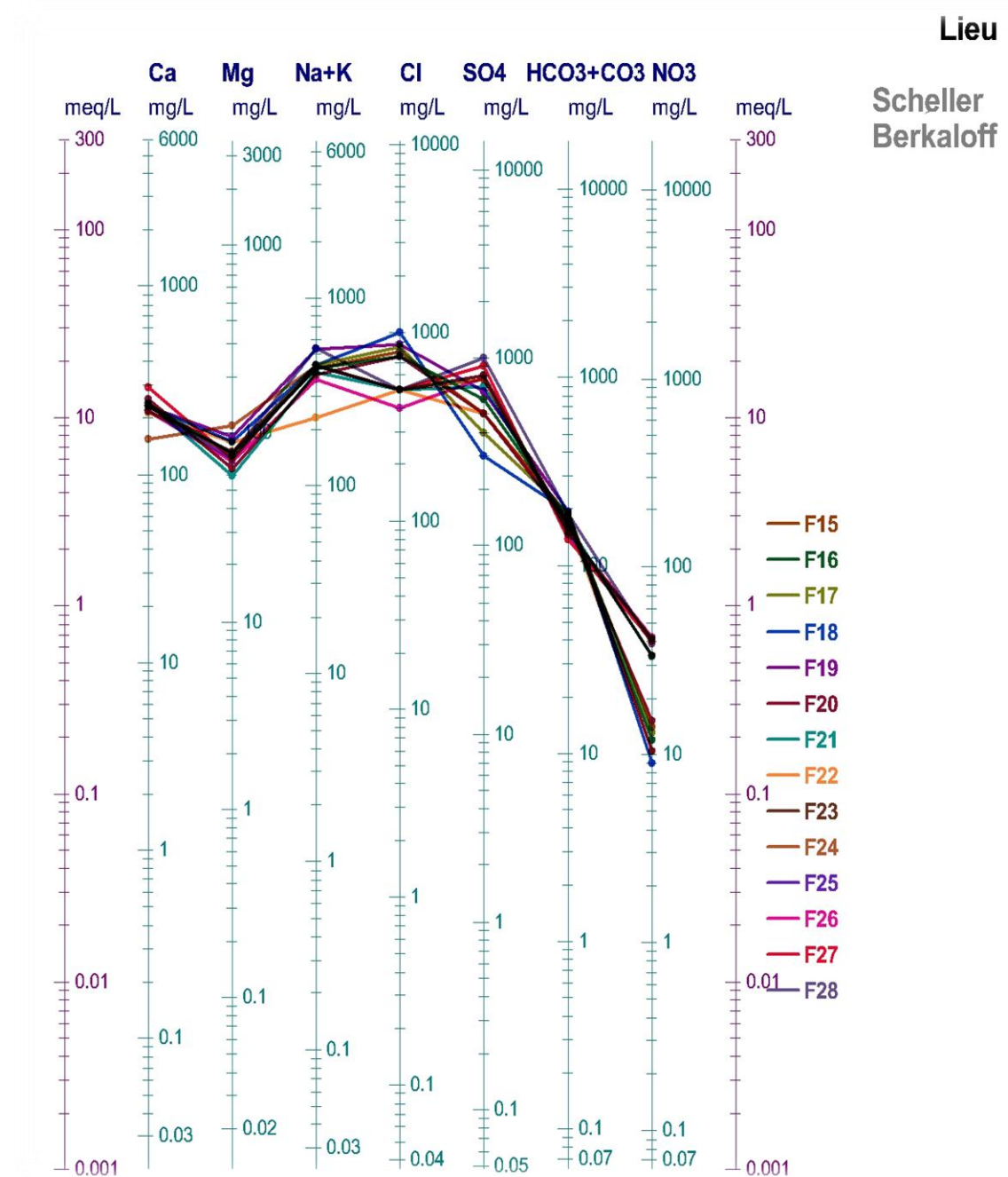


Figure 19 : Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Suite).

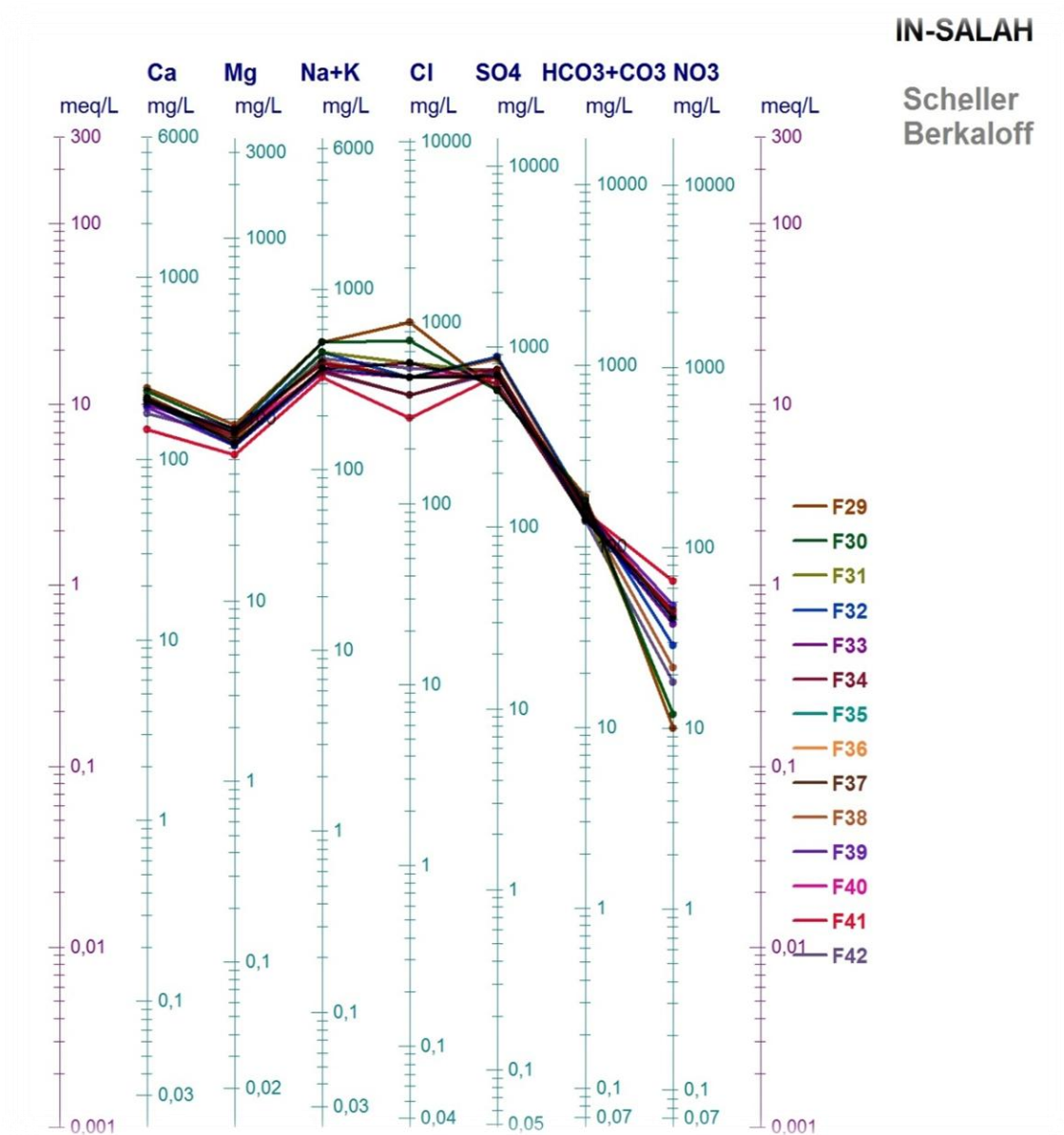


Figure 20 : Représentation des résultats d'analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Suite).

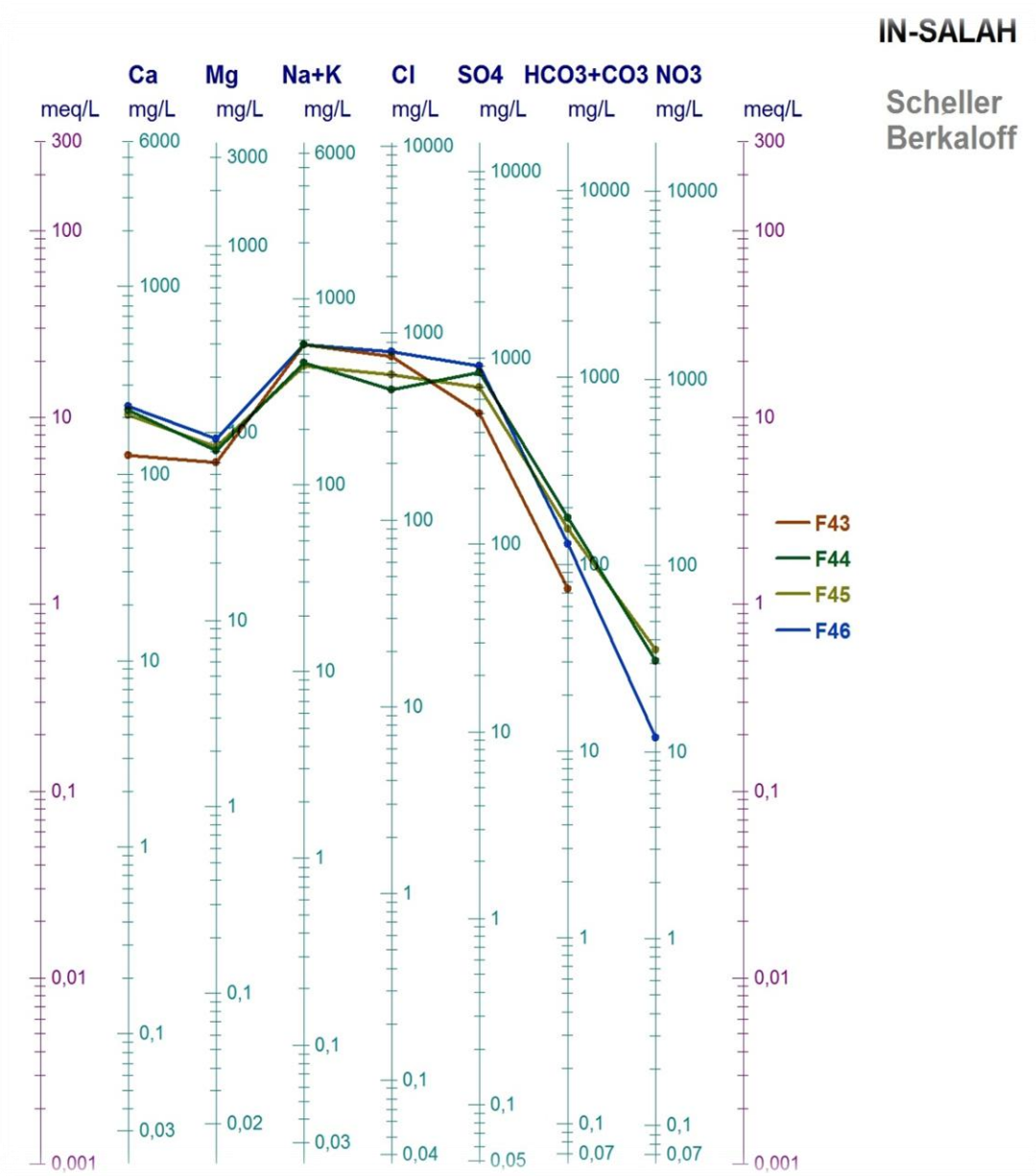


Figure 21 : Représentation des résultats d’analyses selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Suite).

II. Evaluation de la qualité des eaux souterraines dans la région d'In-Salah

L'eau est une ressource naturelle qu'il convient de protéger. Pour cela, la connaissance de la qualité de l'eau est fondamentale, de manière à définir précisément les actions nécessaires à sa protection.

Les caractéristiques chimiques de l'eau sont déterminées selon l'usage auquel on les destine, soit pour l'alimentation en eau potable ou pour des usages agricoles dont ces derniers consomment le plus d'eau au Sahara et dans le monde.

II.1. Evaluation de la qualité des eaux souterraines d'In-salah pour l'irrigation

L'agriculture rencontre des problèmes tels que le risque de salinisation qui peuvent entraîner la stérilité à long terme du sol, en plus de celui de l'alcalinisation des sols qui entraîne la destruction de la structure du sol.

Pour caractériser l'eau d'irrigation dans la région d'étude, nous utilisons les valeurs de la conductivité électrique à 25°C et celles du coefficient d'adsorption du sodium (SAR).

II.1.1. Evaluation du risque de salinité

La salinité provoque des effets directs sur les végétaux et des risques de salinisation du sol. En effet, elle perturbe le développement des végétaux en limitant l'assimilation des éléments nutritifs.

Un niveau de salinité élevé des sols provoque le flétrissement des plantes du fait d'une augmentation de la pression osmotique et des effets toxiques des sels.

La salinité d'une eau est exprimée en terme de conductivité électrique en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette dernière caractérise la faculté de l'eau à laisser passer le courant électrique, elle augmente avec la concentration des ions en solution et la température. Elle est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Généralement, les valeurs sont ramenées à 25° C.

On sait qu'une eau salée est très conductrice, par contre une eau pure est très résistante.

Le Tableau10 montre la classification de l'eau d'irrigation selon Ayers et Westcot (1976)

La plupart des échantillons analysés se situent dans la classe C4. La moyenne des échantillons est de 3379 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau 10)

Tableau 10 : Classification de l'eau basée sur la concentration totale en sels, selon Ayers et Westcot (1976)

Classe de salinité	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Pourcentage %
C1	<250	0%
C2	250-750	0%
C3	750-2250	0%
C4	2250-5000	100%

Classe C1 : Elle est satisfaisante pour toutes les cultures, exceptée les cultures sensibles ;

Classe C2 : En général, elle est satisfaisante bien que quelques cultures sensibles peuvent être affectées ;

Classe C3 : satisfaisante pour la plupart des grandes cultures, mais des conditions de salinité vont se développer si le lessivage et le drainage ne sont pas adéquats ;

Classe C4: Elle est non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées comme le palmier dattier et si le lessivage et le drainage sont impératifs.

II.1.2. Evaluation du risque d'alcalinité

Une grande quantité d'ions de sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû à l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure et par conséquent la culture n'est plus suffisamment alimentée en eau et le rendement diminue.

L'alcalinisation est le processus par lequel la teneur en Na échangeable d'un sol augmente par la fixation sur le complexe adsorbant.

La précipitation rapide des carbonates de calcium et de magnésium permet aux ions sodiques de se fixer sur le complexe. La teneur en ions Na^{2+} et K^+ du sol provenant des sels alcalins (carbonates et sulfates) conduisent à des pH supérieurs à 8.

Le coefficient utilisé est celui d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

Le SAR est défini par l'équation suivante :

$$\text{S.A.R} = \frac{r\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{r\text{Ca}^{++} + r\text{Mg}^{++}}{2}}}$$

Où rNa, rCa et rMg sont les quantités en réaction

du Na, du Ca et du Mg exprimées en meq/l.

Dans la région d'In-Salah, on remarque que la plupart des points d'eaux analysés appartiennent à la classe **S2** avec un pourcentage de 94%. Les classes S1, S3 partagent le 6% restants respectivement, 2% et 4% (Tableau 11).

Tableau 11 : Classe d'alcalinité des eaux selon U.S.S.L (1954)

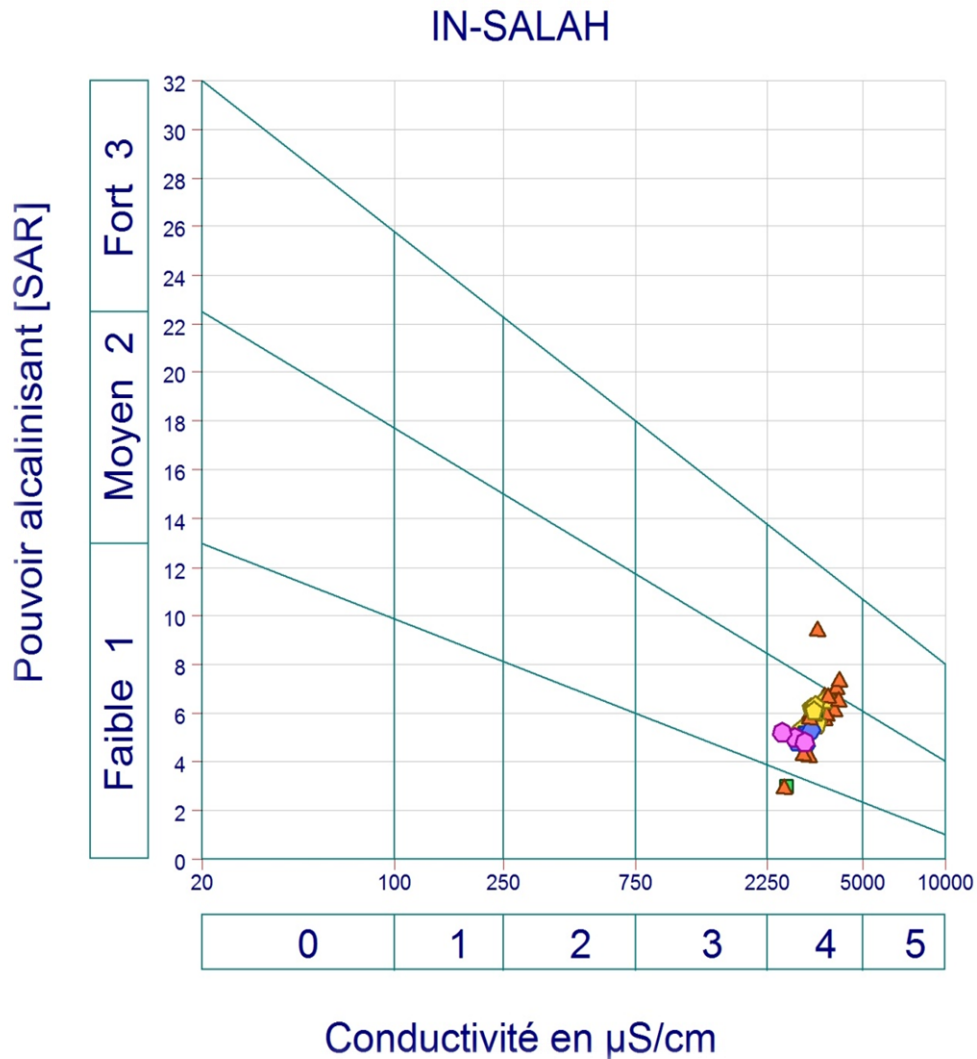
Classes	SAR	Pourcentage
S1	<13	2%
S2	13-23	94%
S3	>23	4%

II.1.3. Classes d'irrigation

Les valeurs obtenues à partir des échantillons analysés ont été reportées sur le diagramme de Riverside où on remarque que l'ensemble des points d'eau se situe dans 3 classes C4 S1, C4 S2, C4 S3, (Figure 22).

Les trois classes d'eau trouvées correspondent aux caractéristiques suivantes :

- **C4 S1** : la qualité est médiocre à mauvaise. L'eau est susceptible de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Cette classe contient deux points d'eau (F25)
- **C4 S2** : la qualité est mauvaise. Elle ne doit être utilisée qu'avec beaucoup de précautions, en particulier dans les sols légers et bien drainés et pour des plantes résistantes. Elle correspond aux forages suivant (F1,F2,F3,F4,F6;F7,F5,F8, F9,F10, F11, F12, F13,F14,F15,F16,F17,F18,F19,F20,F21,F22,F23,F24,F26,F27, F28,F29, F30,F31, F32, F33,F34, F35,F36,F37,F38,F39,F40,F41,F43,F44) qui sont plupart situés en In-Salah centre;
- **C4 S3**: qualité très mauvaise. A n'utiliser que dans des circonstances exceptionnelles (F42, F45) . **M. MIOURIGH**(2011)



II.1.4. Récapitulation sur l'aptitude des eaux d'In-Salah pour l'irrigation

Le SAR varie de 13 à 23, les eaux peuvent provoquer un risque d'alcalinisation des sols. où le danger d'alcalinisation du sol est appréciable dans les sols à texture fine.

La conductivité électrique varie de 2250 mS/cm à 5000 mS/cm, c'est-à-dire la salinité est très forte. cette eau n'est utilisable que si l'on pratique un lessivage intense et pour des cultures très tolérantes; sinon l'eau est inutilisable car elle est très dangereuse sur sols faiblement drainés et peut présenter dans une certaine mesure un danger sur la plupart des cultures

II.2. Evaluation de la qualité des eaux d'In-Salah pour la potabilité

L'eau est la denrée alimentaire la plus contrôlée. La comparaison des paramètres physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines d'In-Salah avec les normes fixées par l'OMS et algérienne est présentée dans le Tableau 12.

Tableau 12: Les normes physico-chimiques d'une eau potable de l'OMS et Algérienne

Paramètres physico-chimiques	Unite	OMS	Les forages d'eau dépassant la Norme
CE	μS/cm	2800	F1,,F3,F4,F6;F7,F5,F8,F9,F10,F11,F12,F13,F14,F15,F16, F17,F18,F19,F20,F21,,F23,F24,F25,,F27,F28,F29,F30,F31 ,F32,F33,F34,F35,F36,F38,F40,F42,F43,F44,F45.F41
TH	°F	50	F1,F2,F3,F4,F6;F7,F5,F8,F9,F10,F11,F12,F13,F14,F15,F16, F17,F19,F20,F21,F22,F23,F24,F25,F26,F27,F28,F29,F30, F31,F32,F33,F34,F35,F36,F37,F38,F39,F40,F41,F42,F43, F44,F45
Mg ⁺⁺	mg/l	150	
Ca ⁺⁺	mg/l	200	F1,F5,F8,F9,F10,F11,F12,F13,F14,F15,F16,F18,F17,F19, F20,F21,F22,F23,F25,F26,F27,F28,F29,F30,F31,F32,F34, F35,F36,F38, F43,F44, F45
Na ⁺	mg/l	200	F1,F3,F4,F6;F7,F5,F8,F9,F10,F11,F12,F13,F14,F15,F16, F17,F18,F19,F20,F21,F23,F24,F25,F26,F27,F28,F29,F30, F31,F32,F33,F34,F35, F36,F37,F38,F39,F40,F41,F42, F43 ,F44, F45
K ⁺	mg/l	20	F1,F3,F4,F6;F7,F5,F11,F13,F14,F16,F18,F19,F22,F23,F24, F25,F26,F27,F28,F29,F36,F37, F38,F39,F41,F42,F43,F44, F45
-- SO ₄	mg/l	400	F1,F2,F3,F4,F6;F7,F5,F9,F10,F11,F12,F14,F15,F16,F19, F20,F21,F22,F23,F24,F25,F26,F27,F28,F29,F30,F31,F32, F33,F34,F35,F36,F37, F38,F39,F40,F41, F42, F43,F44, F45
Cl ⁻	mg/l	250	F1,F2,F3,F4,F6;F7,F5,F8,F9,F10,F11,F12,F13,F14,F15,F16, F1,F19,F20,F21,F22,F23,F24,F25,F26,F27,F28,F29,F30, F31,F32,F33,F34,F35,F36,F37,F38,F39,F18,F41,F42,F43, F44, F45
NO ₃ ⁻	mg/l	50	F40

Le Tableau 12 et les cartes de la répartition spatiale des paramètres physico-chimiques et chimiques, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- **Conductivité électrique** : la majorité des forages d'eau analysés (98%) ont une conductivité supérieure aux normes admises par l'O.M.S. et algérienne ce qui témoigne d'une grande minéralisation des eaux souterraines sauf le forage (F41) inférieur au norme admissible
- **Résidu sec** : On remarque que 6,5% des échantillons analysés respectent la norme de l'O.M.S. fixée à 2000mg/l alors que 94,5% des échantillons dépassent cette norme.
- **La dureté (TH)** : La dureté fait référence à la quantité de calcium et de magnésium contenue dans l'eau. Ces deux éléments proviennent de l'altération de la roche-mère et des échanges de bases. On observe que 98% des échantillons analysés dépassent les normes et présentent des eaux dures surtout celles Zone d'habitat qui sont des eaux très dures (Figure 30).

Il se calcule par la formule suivante : $TH = (r Ca + r Mg) \times 5 \text{ (}^\circ\text{F)}$

r Ca : quantité en réaction du calcium exprimée en méq/l ;

r Mg : quantité en réaction du magnésium exprimée en méq/l.

- **Calcium** : 33 forages d'eau sur 46, soit 72% des forages ont une concentration en calcium supérieure à la norme tolérée par O.M.S
- **Magnésium** : tous les échantillons d'eau analysés, ont une concentration en magnésium inférieur aux normes admises par l'O.M.S.
- **Sodium** : Tous les points d'eaux analyses dépassent les normes, sauf F2,F22
- **Potassium** : Les teneurs en potassium évoluent suivant le sens de l'écoulement ,29% ne dépassent pas les normes.

Chlorures : 45 forages d'eau sur 46, soit 98% des forages ont une concentration en chlore supérieure à la norme tolérée par OMS.

Sulfates : Seulement deux forages présents des valeurs en sulfate inférieure à la concentration maximale acceptable et 44 échantillons analysés soit (96%) ont une concentration supérieure à la concentration maximale admissible

Bicarbonates : Les teneurs des échantillons analysés en bicarbonates respectent les normes à In-Salah.

- L'origine des bicarbonates est peut être la dissolution des formations carbonatées par des eaux chargées en gaz carbonique ; . **M. MIOURIGH(2011)**

- **Nitrates** : Tous les points d'eau ont une concentration de nitrates admis aux normes de l'OMS, sauf le forage d'IGOUSTEN (F41) qui dépasse la norme admissible qui être due à la pratique agricole qui consiste à appliquer abondamment des engrais industriels ou du fumier

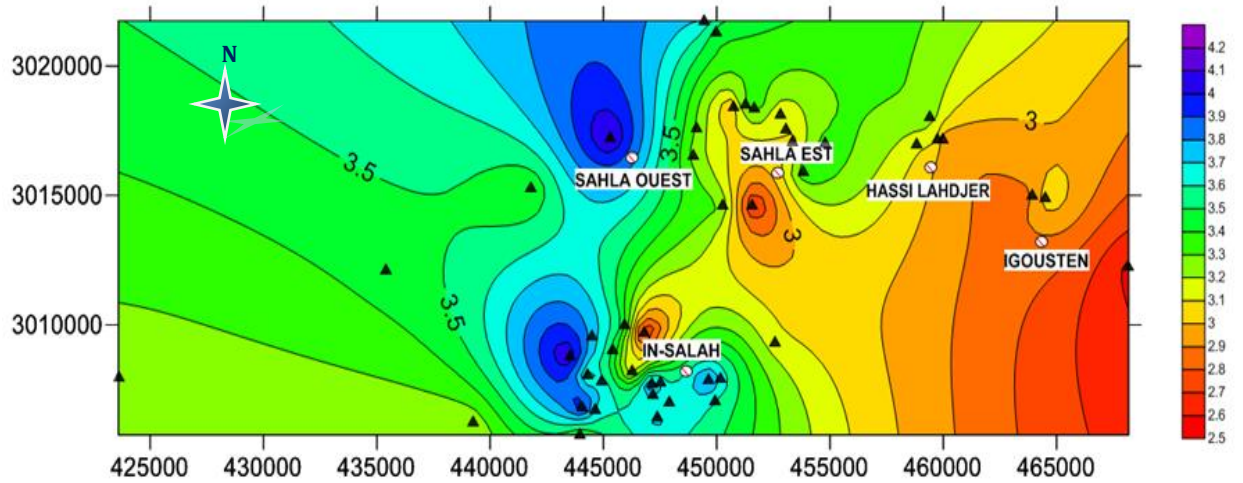


Figure 23 : Variation de la conductivité électrique dans la région d'In-Salah ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

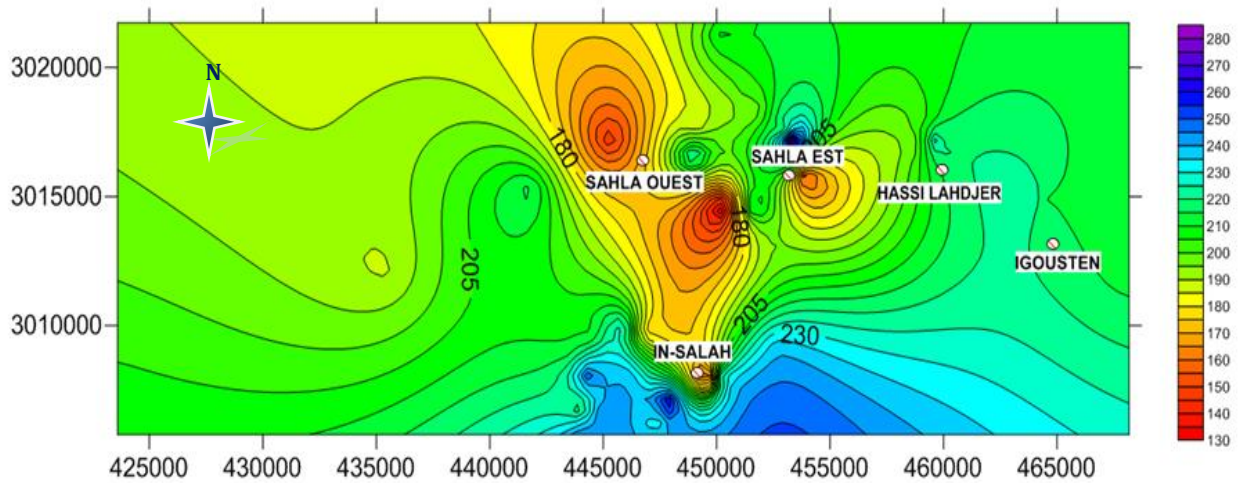


Figure 24 : Variation spatiale de la Ca^{++} dans la région d'In-Salah (mg/l)

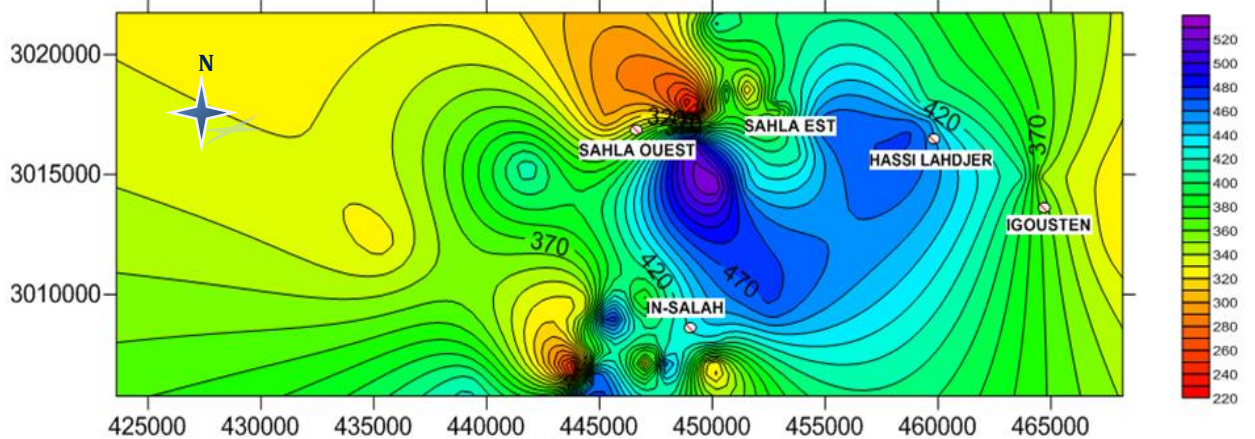


Figure 25 : Variation spatiale de Na^{+} dans la région d'In-Salah (mg/l)

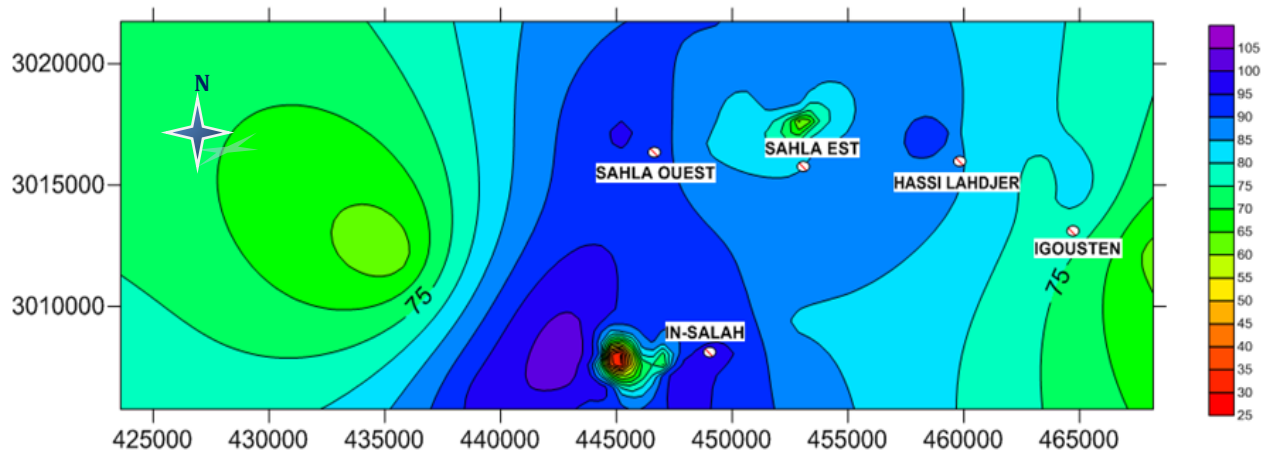


Figure 26 :Variation spatiale de la dureté (F°)

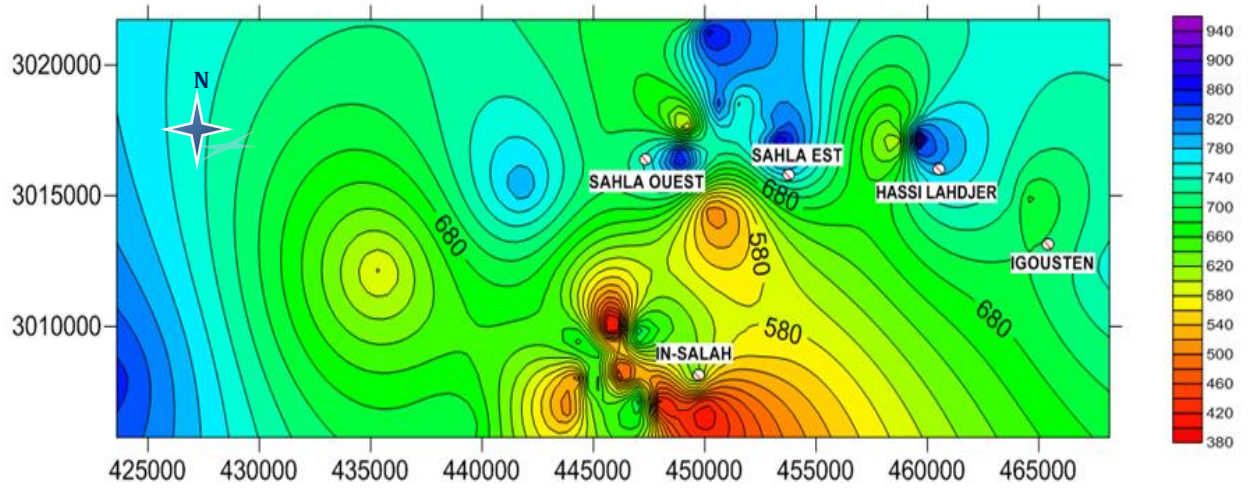


Figure 27 :Variation spatiale de sulfate (mg/l)

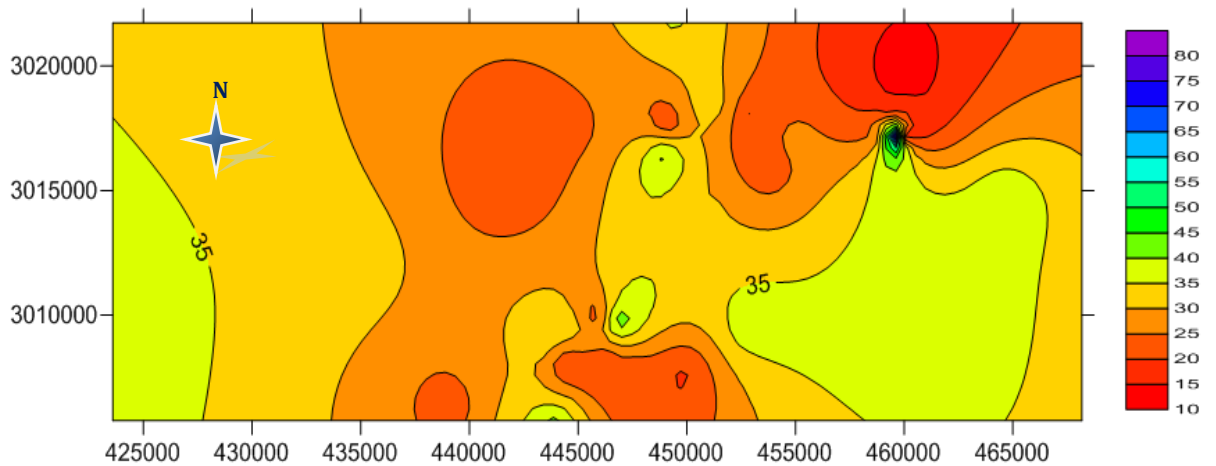


Figure 28 :Variation spatiale de Potasiume (mg/l)

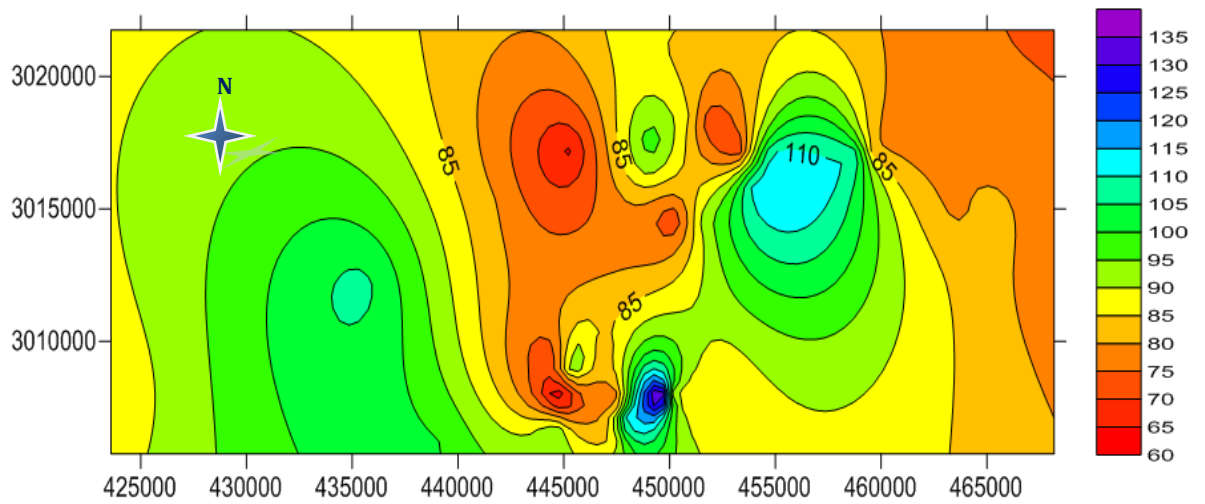


Figure 29 : Variation spatiale de Magnesium (mg/l)

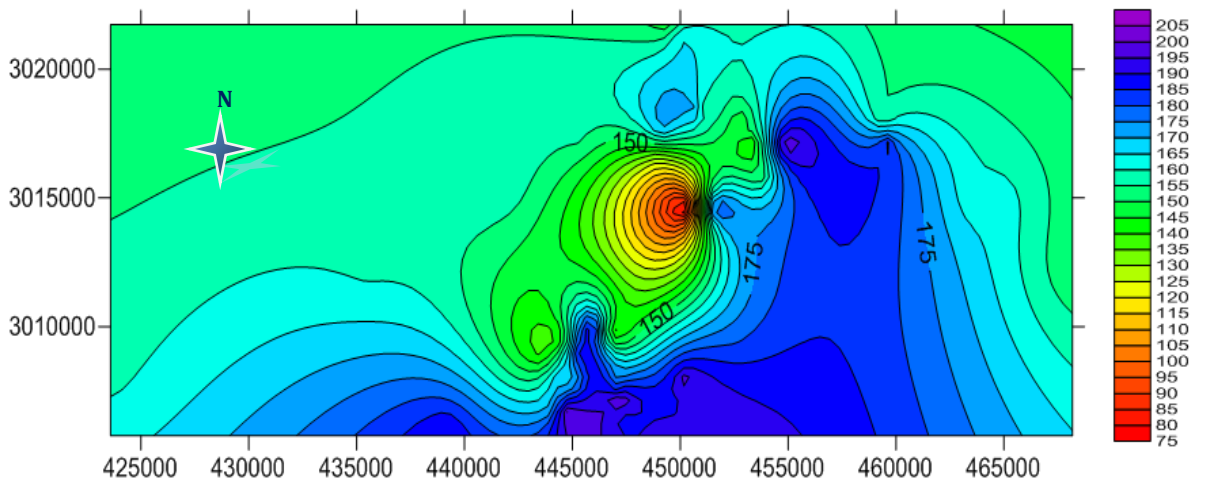


Figure 30 : Variation spatiale de Bicarbonat (mg/l)

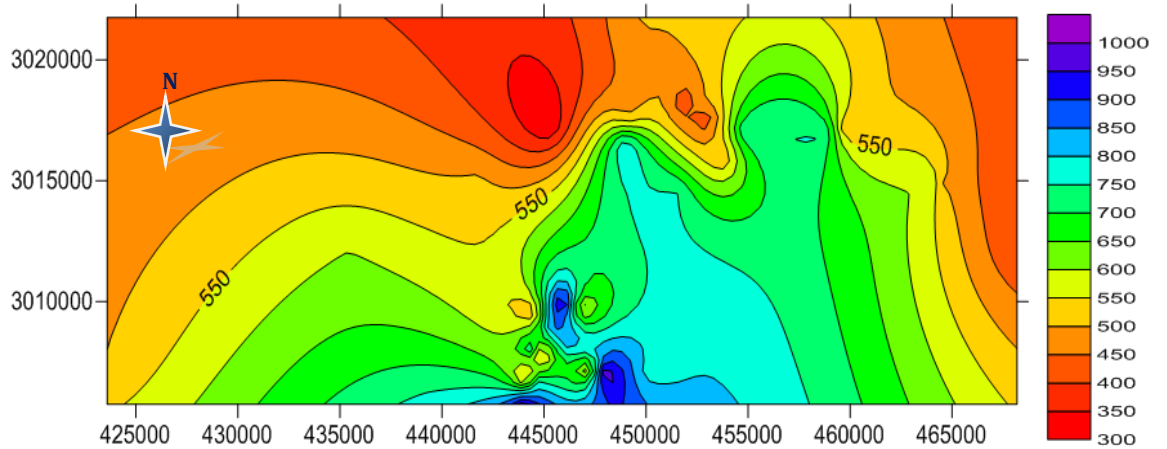


Figure 31 : Variation spatiale de Chlorure (mg/l)

L'évaluation hydrochimique des eaux souterraines de la région d'In-Salah a révélé que la plupart des eaux sont chargées en sels et qu'elles présentent un danger de salinité fort (C4). Les valeurs de conductivité électrique sont comprises entre 2250 et 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et elles correspondent sur le diagramme de Riverside au classe (C4), Quant à l'appréciation du danger d'alcalinité, les eaux se distinguent par les classes de danger allant du faible (S1) au fort (S3). Même si la texture des sols d'In-Salah à dominante sableuse, le drainage naturel ou artificiel est obligatoire.

Les eaux souterraines sont pratiquement la seule ressource utilisée dans l'irrigation des cultures et l'alimentation en eaux potable. Les résultats chimiques de ces eaux justifient le choix des cultures à pratiquer en l'occurrence celles tolérantes en sels.

Du point de vue potabilité, la majorité des eaux de la nappe souterraine de la région d'In-Salah sont de qualité médiocre et donc impropre à la consommation humaine, sauf quelques forages qui sont relativement moins chargés en sels.

III. Etude statistique des données hydrochimiques

III.1. Statistique descriptive

L'analyse statistique des données hydrochimiques est basée sur la description quantitative (le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart -type et le coefficient de variation).

- Le minimum et le maximum

Ils représentent la plus grande et la plus petite valeur de l'échantillon.

- La moyenne arithmétique

La moyenne arithmétique d'une série quantitative est définie par la somme des valeurs observées, divisée par l'effectif total.

- L'écart-type

L'écart-type observé correspond à la racine carrée de la variance observée.

- Le coefficient de variation (CV)

Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart-type et la moyenne.

Les paramètres statistiques des variables physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines d'In-Salah sont reportés dans le Tableau 13

$$(cv) = \frac{\text{Ecart - type}}{\text{Moyenne}} \times 100$$

Tableau 13 : Paramètres statistiques des variables physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines d'In-Salah

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
CE	2,573	4,124	3,379	0,367	10,87
Ca ⁺⁺	126	288,4	213,7	30,4	14,23
Mg ⁺⁺	59,4	145,5	86,72	15,58	17,97
Na ⁺	200	530	392,8	71,91	18,31
K ⁺	20	88	28,87	11,72	40,6
Cl ⁻	300	1000	636,19	175,92	27,65
SO ₄ ²⁻	300	1000	667,67	150,63	22,56
HCO ₃ ⁻	73,2	204	167,49	24,36	14,54
NO ₃ ⁻	0	65	23,74	15,51	65,33

CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$; Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ et NO₃⁻ en mg/l.

III.1.1. Conductivité électrique

Le Tableau 12 montre que :

- La valeur maximale de la CE est de **4,124** $\mu\text{S}/\text{cm}$ qui concerne le foage F45, et la valeur minimale est de 2,573 $\mu\text{S}/\text{cm}$ enregistrée au niveau de foage F41
- La moyenne est d'environ **3,379** $\mu\text{S}/\text{cm}$,
- Le coefficient de variation est de 10,87%, ce qui traduit une grande variabilité.

III.1.2. Calcium

Le Tableau 12 montre que :

- La valeur la plus élevée (**288,4**mg/l) est enregistrée au foage F35 , tandis que la valeur la plus faible (**126**mg/l) est enregistrée au foage F23;
- La moyenne des teneurs en calcium est de **213,7**mg/l;
- Le coefficient de variation est 14,23%.

III.1.3. Magnésium

L'analyse du Tableau 12 donne les résultats suivants :

- La valeur la plus élevée (**145,5**mg/l) est enregistrée au niveau de foage F6 qui dépasse largement les autres échantillons, alors que le minimum (**59,4**mg/l) est

mesuré au foage F18

- La moyenne est d'environ **86,72 mg/l**,
- Le coefficient de variation est 17,97%.

III.1.4. Sodium

Le Tableau 12 montre que :

- La valeur la plus élevée (**530 mg/l**) est enregistrée au foage F23, alors que la valeur la plus faible (**200mg/l**) est enregistrée au forage F19 alors que la moyenne est de **392,8mg/l**
- Le coefficient de variation est de l'ordre de 18,31% ce qui signifie une très grande.

III.1.5. Potassium

Nous constatons au niveau du Tableau 12 que:

- Le potassium est l'élément le moins abondant parmi les cations avec une valeur maximale de 88 mg/l qui correspond au foage F36et une valeur minimale de 20 mg/l qui correspond au foage F5
- La moyenne est de l'ordre de 28,87 mg/l ;
- Le coefficient de variation est 40,6%.

III.1.6. Chlorures

Le Tableau 12 indique que :

- L'échantillon qui présente la valeur la plus élevée est foage F10 avec 1000 mg/l, la valeur la plus faible est enregistrée au foage F45 avec 300 mg/l, et il est obtenu une moyenne de 636,19 mg/l ;
- Le coefficient de variation est 27,65% .

III.1.7. Sulfates

L'analyse du Tableau 12 donne les résultats suivants:

- Les sulfates présentent une valeur maximale de 1000mg/l qui correspond au foage F36 et une valeur minimale de 300mg/l ;
- La moyenne du sulfate est 667,67mg/l.
- Le coefficient de variation est de 22,56%,

III.1.8. Bicarbonates

Le Tableau 12 montre :

- La valeur maximale de HCO_3 est de 204 mg/l qui concerne le foage F11, et la valeur minimale est de 73,2 mg/l enregistrée au niveau de foage F23;
- La moyenne est d'environ 167,49 mg/l,
- Le coefficient de variation est très faible (14,54%), donc la distribution mathématique de la variable HCO_3 est proche de la loi normale.

III.1.9. Nitrates

Nous constatons à travers le Tableau 12 :

- La valeur la plus élevée (65 mg/l) est enregistrée au foage F45, alors que la valeur la plus faible (0 mg/l) est enregistrée au foage F10, avec une moyenne de 23,74 mg/l ;
- Le coefficient de variation est de 65,33%, donc une grande variabilité. **M. MIOURIGH(2011)**

III.2. Corrélation entre les variables

Le but d'une analyse de corrélation est de mesurer la relation statistique qui existe entre deux variables. Cette relation est appelée le coefficient de corrélation (r). Il est mesuré par la relation suivante :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Avec : **X_i** : La valeur de la variable x pour l'individu i ; **Y_i** : La valeur de la variable y pour l'individu i ; **\bar{X}** : moyenne de la variable x ; **\bar{Y}** : moyenne de la variable y ;
n : Nombre d'individus

Les résultats des coefficients de corrélation entre les variables sont résumés dans le tableau14.

Tableau 14 : Matrice de corrélation entre les variables

	CE	Ca ⁺⁺	Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
CE	1								
Ca ⁺⁺	0.34	1							
Mg ⁺	0.36	-0.21	1						
Na ⁺	0.77	0.14	0.20	1					
K ⁺	0.17	-0.02	-0.10	0.14	1				
Cl ⁻	0.74	0.31	0.45	0.58	-0.10	1			
SO ₄ ⁻	-0.04	-0.07	-0.20	0.10	0.14	-0.62	1		
HCO ₃ ⁻	0.29	0.43	0.42	0.00	-0.10	0.41	-0.26	1	
NO ₃ ⁻	-0.52	-0.22	-0.41	-0.40	0.10	-0.75	0.47	-0.37	1

En gras, les valeurs significatives au seuil de probabilité ($\alpha=0,05$) (test bilatéral)

L'analyse du Tableau 13 et les Figures 37, 38, 39, et 40 donnent les résultats suivants :

La variation de la conductivité électrique en fonction de (Na²⁺, Cl⁻, NO₃⁻)

(figure 37), montre une très bonne corrélation linéaire ($r=0.78$). Cela indique que la salinité des eaux est fortement contrôlée par nitrates NO₃⁻ ($r=0,52$) les chlorures ($r=0,74$), le potassium ($r=0,77$),

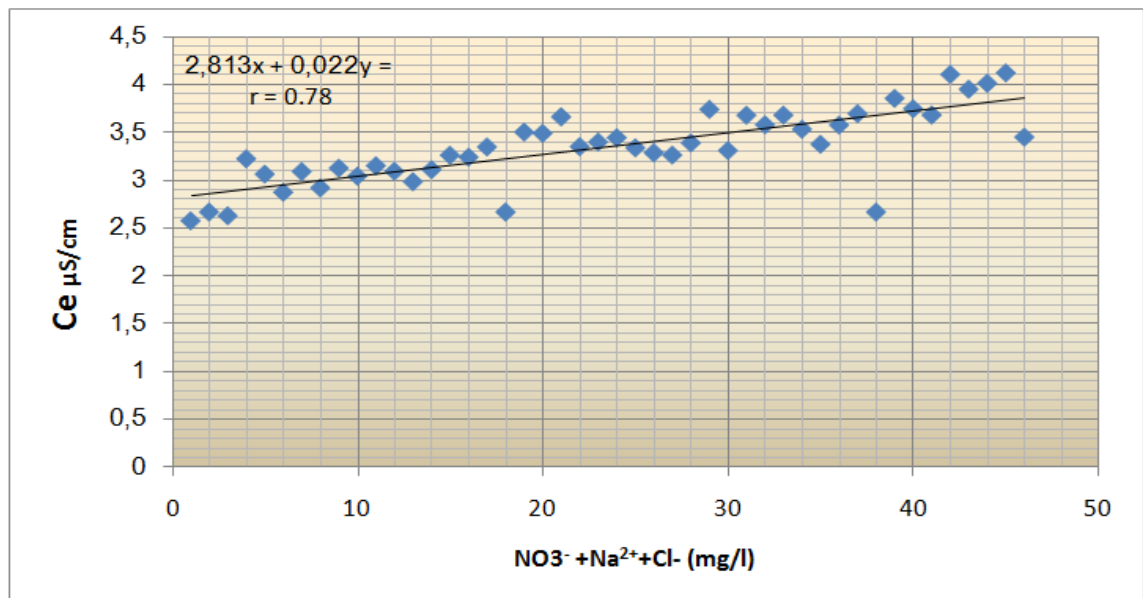


Figure 32: Droite de régression entre la CE et (NO₃⁻ + Na²⁺ + Cl⁻)

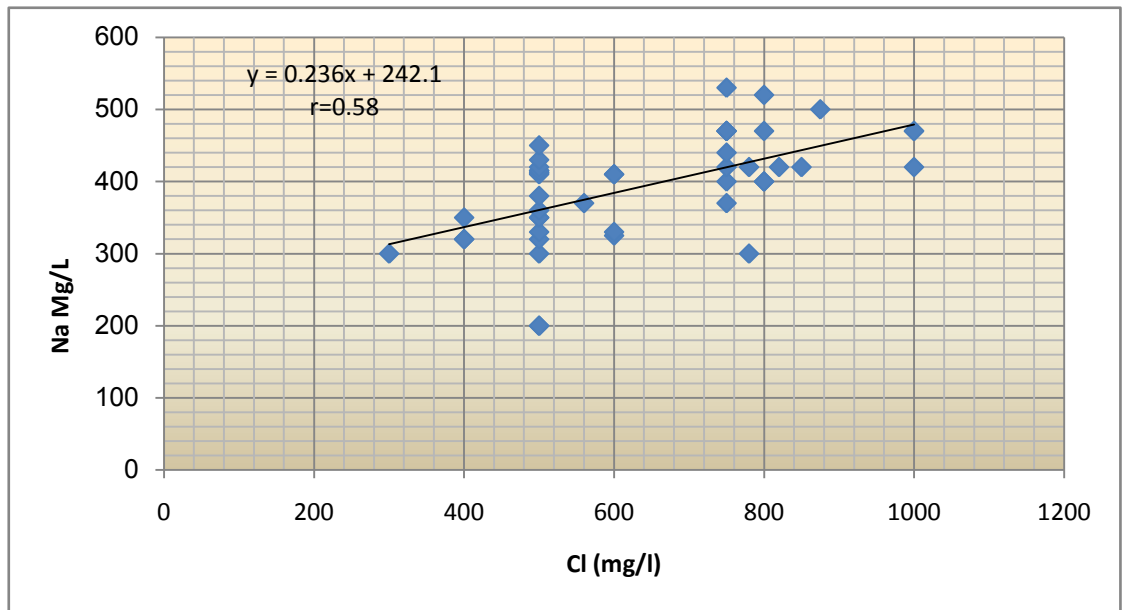


Figure 33 : -La conductivité est fortement corrélé avec le sodium

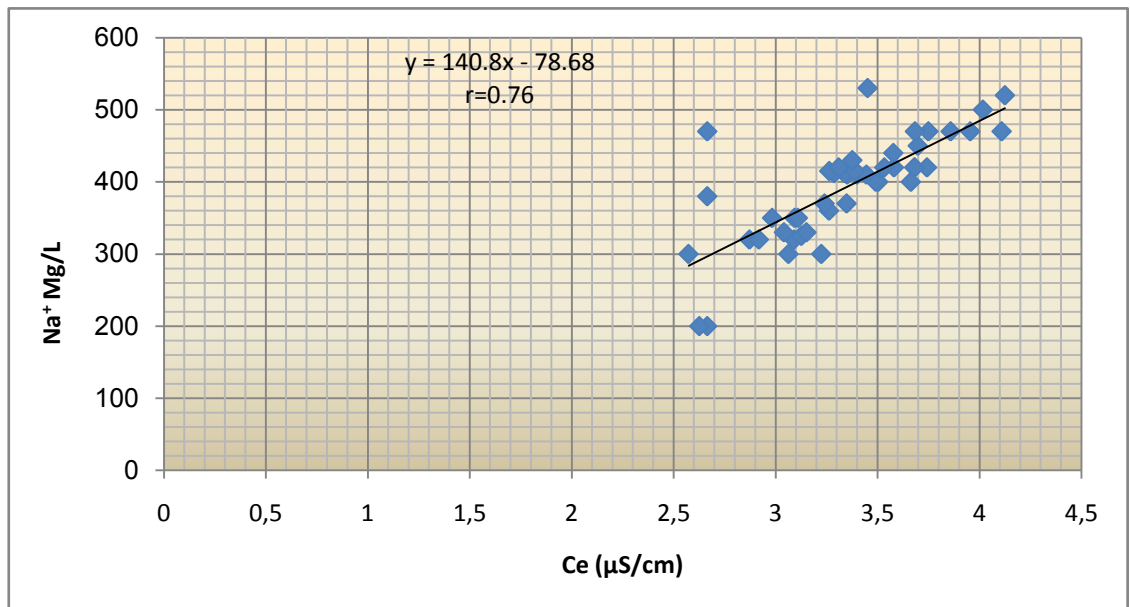


Figure 34: Droite de régression de sodium en fonction de (Cl⁻)

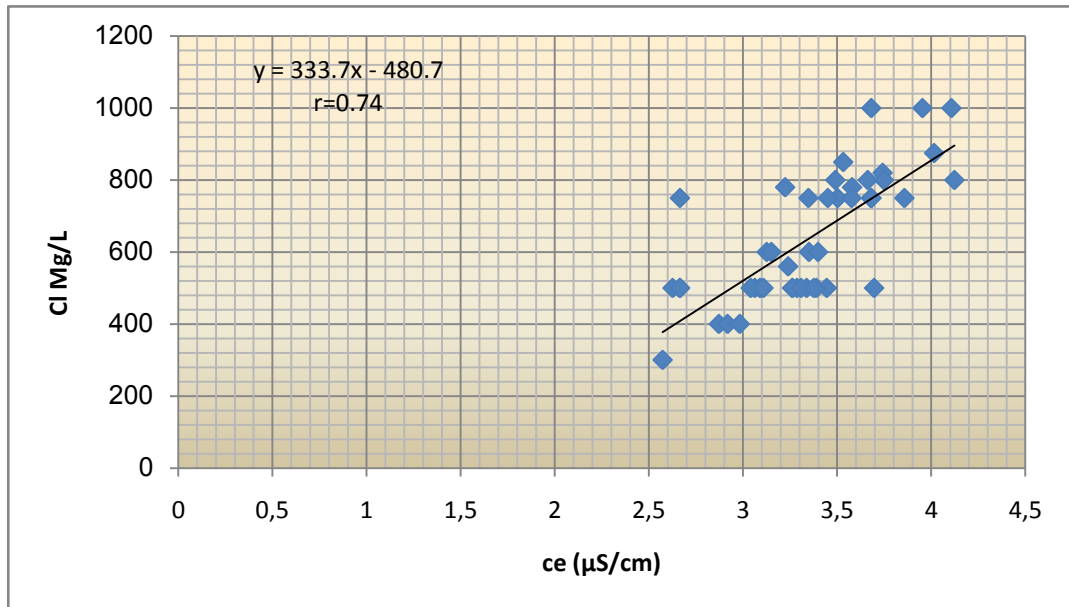


Figure 35: Droite de régression de conductivité en fonction de (Cl)

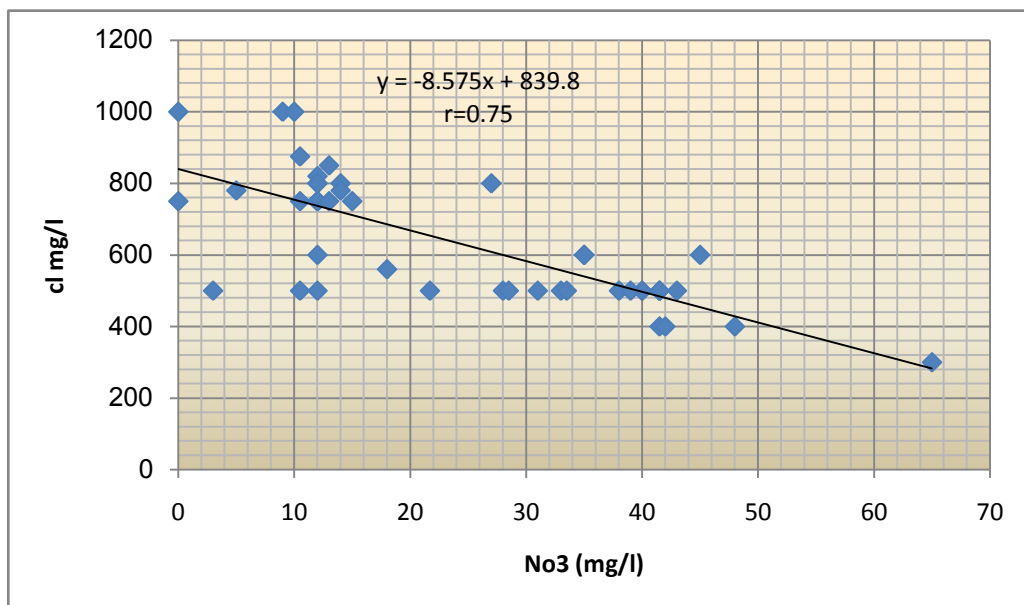


Figure 36: Droite de régression de conductivité en fonction de (NO3)

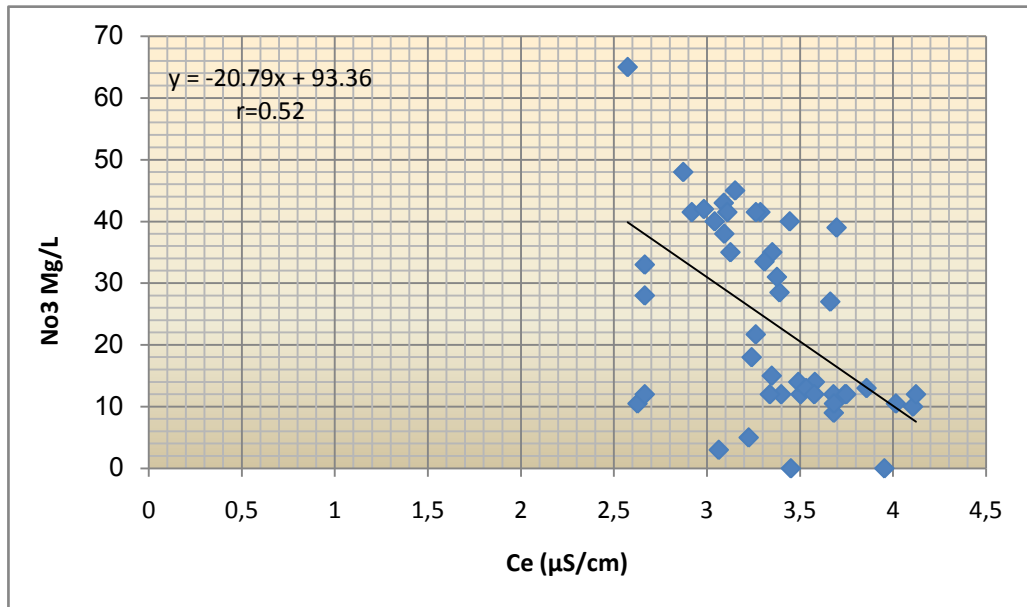


Figure 37: Droite de régression de Chlorure en fonction de (SO_4^-)

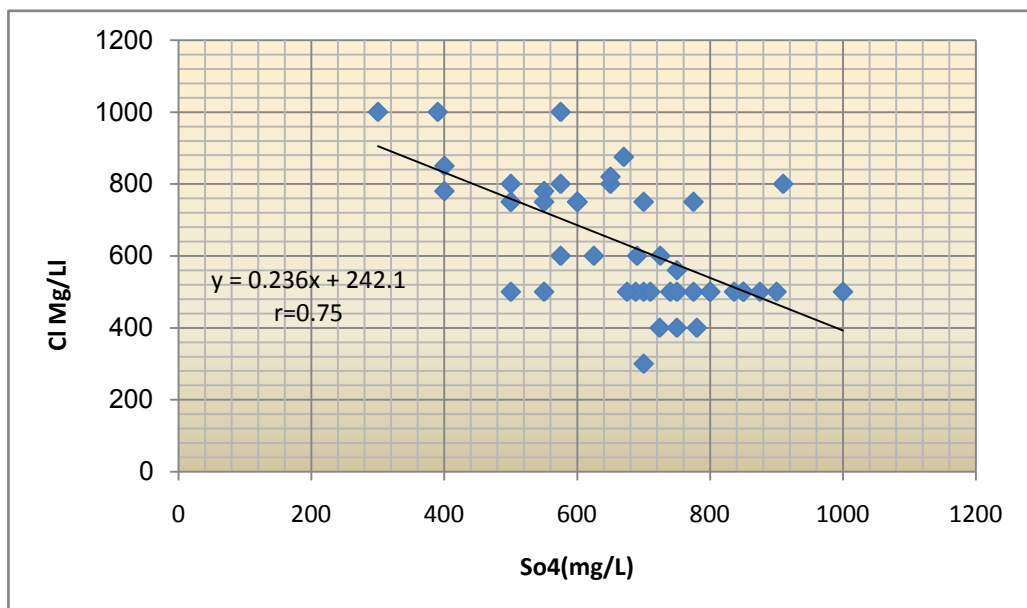


Figure 38: Droite de régression de Chlorure en fonction de (NO_3^-)

IV. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique essentiellement descriptive, son objectif est de présenter sous forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données.

L'ACP sert à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles.

IV.1. Principe de l'ACP

L'ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales.

IV.2. Application de l'ACP

L'ACP a été appliquée sur 46 forage et 9 variables (CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , et NO_3^-). Le logiciel utilisé est XLstat Addinosoft (2013).

IV.2.1. Etude des valeurs propres

Une valeur propre représente la variation des individus sur l'axe correspondant. Dans le but de faciliter leur interprétation, le Tableau 14 met en évidence les valeurs propres de chaque axe factoriel, ces valeurs sont exprimées en pourcentage de variance totale ainsi que leur cumul.

Le premier axe principal a une valeur propre égale à 3,119, il explique 34,65% de la variance totale, la seconde composante égale à 1,714 correspond à un pourcentage de 19,04%. Ces deux premiers axes englobent l'ensemble de l'information avec 53,69% de la variance totale. Ces derniers sont jugés suffisants pour une approche d'analyse des variables et des individus (Tableau 15). On peut aussi présenter sous forme d'histogramme d'information de chaque axe (Figure 39).

Tableau 15 : Valeurs propres et pourcentage de la variance expliquée par les axes principaux

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Valeur propre	3,119	1,714	1,233	0,972	0,725	0,623	0,313	0,252	0,048
Variabilité (%)	34,65	19,04	13,61	10,71	8,06	6,92	3,41	2,80	0,53
% cumulé	34,65	53,67	67,34	78,11	86,25	93,178	96,66	99,46	100

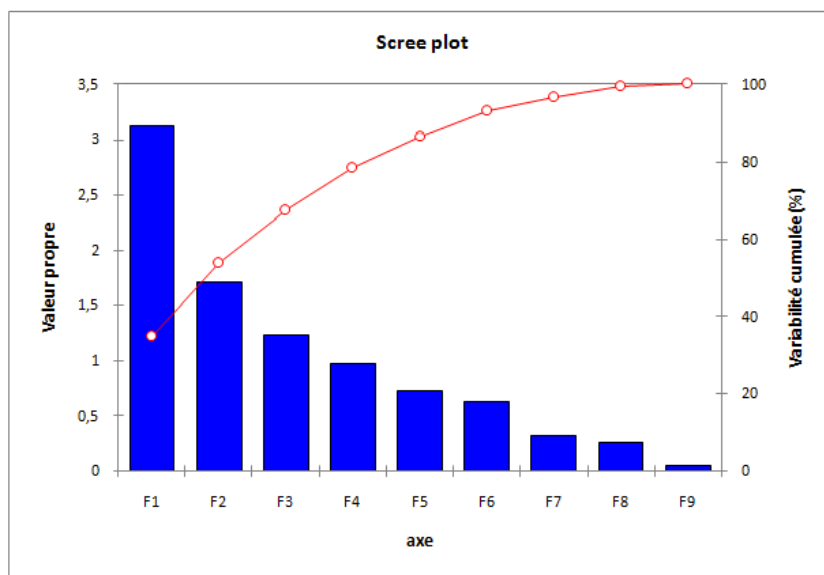


Figure 39 : Histogramme des valeurs propres

IV.2.2. Etude des variables

La contribution de chaque variable dans la formation d'une composante principale est donnée par le coefficient de corrélation entre la variable et l'axe considéré. Plus le coefficient est important, plus la variable contribue à la formation de l'axe. Les résultats sont résumés dans le Tableau 16. **M. MIOURIGH(2011)**.

Tableau 16 : Corrélation des variables par rapport aux axes principaux

	F1	F2
Ce	0,093	0,535
Ca ⁺	0,192	-0,156
Mg ⁺	0,321	-0,007
Na ⁺	0,249	-0,527
K	-0,144	-0,484
HCO ₃ ⁻	0,356	0,060
Cl ⁻	0,528	-0,106
SO ₄ ⁻	-0,375	-0,380
NO ₃ ⁻	-0,472	0,135

CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$; Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, et NO₃⁻ en mg/l.

L'analyse du tableau 15 et du cercle de corrélation (Figure 42) permettent d'identifier certaines relations entre les variables étudiées :

- Sur l'axe F1 : la composante F1 est corrélée avec les variables Mg, Cl, Ca et HCO₃. Toutes les variables évoluent positivement et SO₄, NO₃ qui sont corrélée négativement à cet axe cet axe correspond. Nous remarquons par rapport à cet axe que les variables CE, K et Na ne sont pas corrélées ;
- Sur l'axe F2 : la composante F2 explique les variables CE qui est corrélées positivement et Na et K qui sont corrélée négativement à cet axe

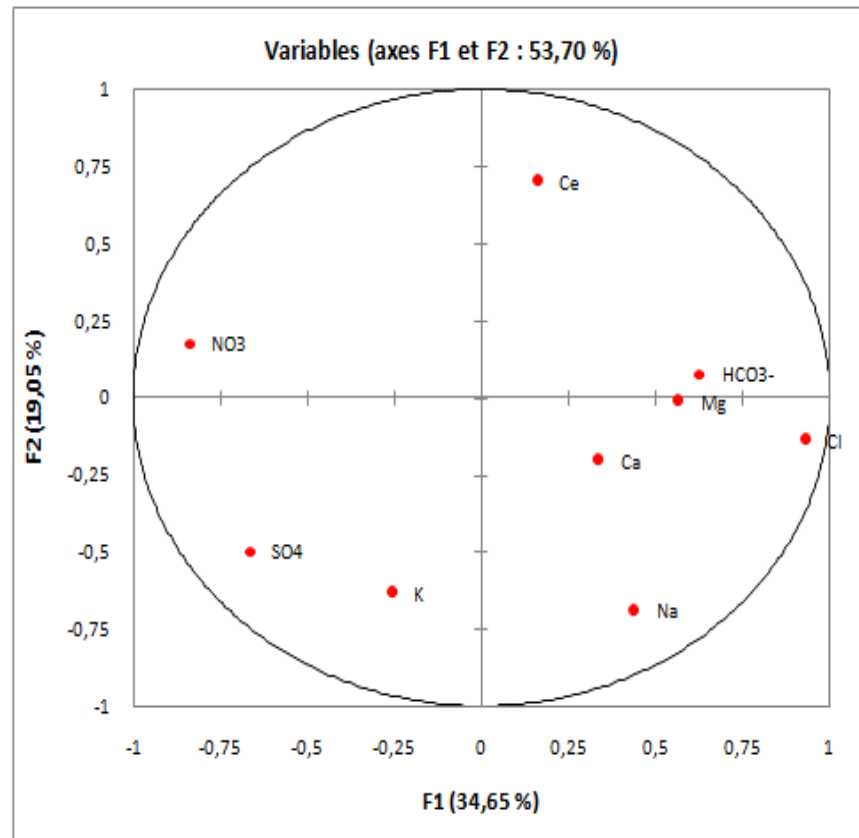


Figure 40 : Cercle de corrélation des variables dans le plan formé par l'axe F1 et F2.

IV.2.3. Etude des individus

La projection des individus sur le plan (F1-F2) nous permet d'avoir une répartition selon quatre groupes (Figure 41) :

- Le premier groupe est représenté par la couleur orange, il concerne les forages [F1-F17] et F20, F21, il se caractérise par des valeurs élevées de la plupart des éléments chimiques et globalement, il dépasse les normes de potabilité, de l'irrigation
- Le deuxième groupe est représenté par la couleur bleu, il englobe F24, ces individus présentent des valeurs élevées par rapport à l'ensemble des points et il dépasse les normes de potabilité,.
- Le troisième groupe (couleur vert) rassemble la majorité des points d'eau [22-35] et [37-45], ces derniers se caractérisent par des valeurs faibles de la plupart des éléments chimiques, ils sont conformes aux normes de potabilité, de l'irrigation
- Quatrième groupe (couleur joun) concerne un seul point d'eau (F46), il se caractérise par une concentration élevée en HCO₃ qui dépasse largement la norme de potabilité et des

teneurs faibles des autres éléments chimiques.

- cinquième groupe (couleur rouge) concerne un seul point d'eau (F36), il se caractérise par une concentration élevée en K qui dépasse largement la norme de potabilité et des teneurs faibles des autres éléments chimiques. . **M. MIOURIGH**(2011)

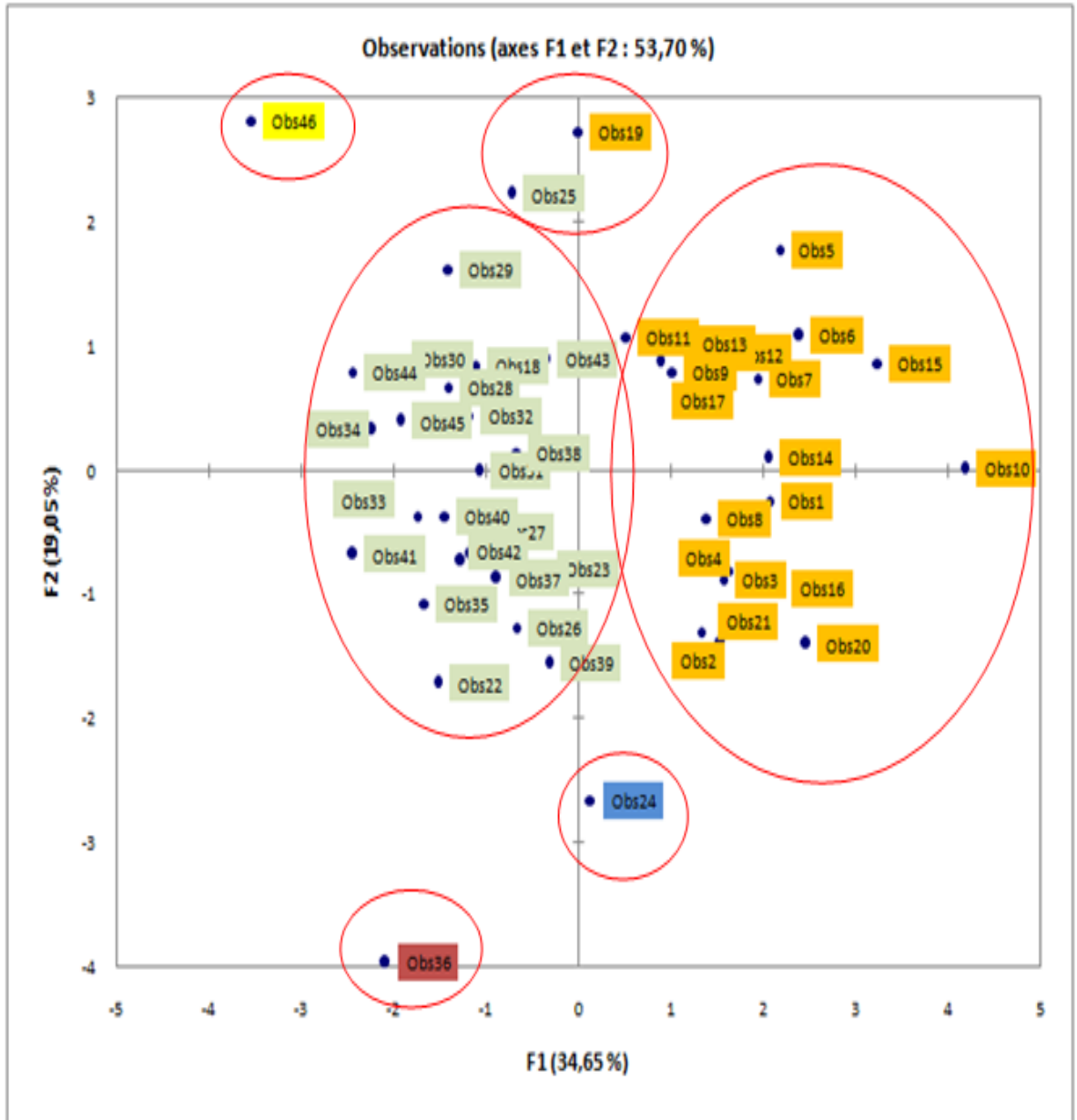


figure 41 : Répartition des individus dans le plan formé par les axes F1 et F2.

Conclusion générale

Conclusion

Ce travail entrepris dans la région d'In-Salah a porté principalement sur la caractérisation et l'évaluation hydrochimique de la nappe souterraine d'In-Salah

Pour répondre aux objectifs fixés nous avons utilisé un ensemble méthodes de classification, d'évaluation et d'analyse statistique.

L'utilisation de différentes méthodes de classifications des eaux souterraines de la région d'In-Salah telles que les classifications de Schoeller-Berkaloff et Piper montrent l'existence d'un faciès chimique dominant qui est le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien. Il n'y a pas de cation dominant dans la majorité des eaux analysées avec la présence d'un échantillon où le calcium domine. En revanche parmi les anions, les sulfates dominent dans la plupart des points d'eau observés, suivi par un autre groupe contenant aucun anion dominant.

L'évaluation hydrochimique des eaux souterraines de la région d'In-Salah a révélé que la plupart des eaux sont chargées en sels et qu'elles présentent un danger de salinité allant du fort (C3) à excessif (C4). Quant à l'appréciation du danger d'alcalinité, les eaux se distinguent par les classes de danger allant du faible (S1) au fort (S3). Même si la texture des sols d'In-Salah est à dominante sableuse, le drainage naturel ou artificiel est obligatoire. Du point de vue potabilité, la majorité des eaux de la nappe souterraine sont de qualité médiocre et donc impropre à la consommation humaine, sauf quelques points d'eau à l'instar des points (F2)(F26), (F22)(F37) et (F41) qui sont relativement moins chargés en sels.

L'analyse statistique élémentaire des paramètres physico-chimiques et chimiques des eaux souterraine de la région d'In-Salah, a permis de conclure que :

- Le pH de l'eau a un caractère neutre dans l'ensemble et évoluant vers le basiques.
- La composition en ions majeurs identifié des corrélations fortes entre les éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), ainsi entre ces éléments et la CE (conductivité électrique).
- Les nitrates sont indépendants de toutes les autres variables, du fait de leur origine exogène au milieu hydrogéologique.

Conclusion

L'analyse en composantes principales, a mis en évidence les relations suivantes :

- Les variables chimiques dominantes dans les eaux souterraines sont les chlorures, les sulfates, le calcium, le sodium et le magnésium ;
- La projection des individus montre l'existence de trois familles.

A partir de ces résultats préliminaires obtenus, nous proposons quelques recommandations :

- Installer une station de déminéralisation dans la région ou un réseau de traitement par la dilution de ces eaux par des eaux peu chargé en sel ;
- Optimiser l'irrigation et installer un réseau de drainage pour éviter une salinisation secondaire du sol ;
- Enfin, il est souhaitable de poursuivre ce travail en faisant une extension spatiale de la zone d'étude, afin de mieux comprendre la variabilité spatiale de la salinité des eaux de la nappe souterraine de la région d'In-salah

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

1. AGENCES DE L'EAU (France); *Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines* «Rapport de présentation», V-1, 75p. (2003)
2. AYERS R.S., WESTCOT D.W ; *La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin F.A.O. Irrigation Drainage*, n.29, 97p. (1976).
3. BOUCHKIMA .B, *L'eau De La Nappe Albienne Du Sud Algérien* ; Journées techniques et scientifiques des eaux du Sud, 19 et 20 mai 2003
4. BRL, BNEDER.; *Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes Les ressources en sols*, Ministère d'agriculture-Algérie, (1998).
5. DEGREMONT .SA ; *Mémento technique de l'eau*, Degrémont Edition 10-1579p. (2005).
6. DRE TAMANRASSET ; *Inventaire des forages d'eau dans la région de Tidikelt*; «Rapport technique». (2010) .
7. MAZA.N; *Qualité et quantité des eaux en irrigation dans les régions sahariennes* ; Journées techniques et scientifiques des eaux du Sud, (2003).
8. NESSON C, SARI D. ET PEILLON P; *L'évolution des ressources hydriques dans les oasis du Bas Sahara Algérien*. Recherches sur l'Algérie, vol.17, p. 7-100. (1978)
9. RODIER.J; *Analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer*. Paris, Dunod, 1579p (2009).
10. SEDAT; *Etude et Système du Drainage de la région de Tidikelt* ; « Rapport technique ». (2011).
11. **M. MIOURIGH MOHAMMED** Evaluation de la qualité hydrochimique des eaux souterraines de la vallée du M'Zab : Cas de l'Oued N'Tissa . mémoire d'Ingénieur d'Etat en Agronomie , Option Hydraulique agricole (2011)
12. **BEN ALI KALTHOUM**, L'efficacité de traitement des eaux naturelles issues de la nappe continentale intercalaire au niveau d'In-Salah , mémoire de Master en Géologie Option hydro géologie(2013)

Mots clés: In-Salah, nappe souterraine, forage, Analyse physico-chimiques, classification des eaux, Analyse statistique.

Résumé

La région d'In-Salah se caractérise par un climat aride. En effet les eaux souterraines sont considérées comme la principale source pour la satisfaction des besoins agricoles et l'alimentation en eau potable de la population.

L'objet de ce travail est de caractériser les eaux souterraines de la région d'In-Salah. A cette effet, nous sommes basé sur un campagne de mesures d'analyses physico-chimiques sur les eaux souterraines d'In-Salah, fait par des organismes spécialisé portant sur 46 forages dans le continentale intercalaire a permis de caractériser le chimisme des eaux souterraines en vue de leurs utilisation dans l'alimentation en eau potable et en irrigation

L'évaluation de la qualité hydro-chimique avec L'analyse multidimensionnelle (ACP) montre que la qualité des eaux de la région d'In-Salah mouvais à médiocre dont la salinité est trop élevé déconseillé à l'utilisé dans l'alimentation en eau potable que après le passage à travers s d'une station de traitement et inutilisable dans la pratique agricole que pour les cultures tolérants ou après le pratique d'un lessivage intense pour le sol.

Keywords: In-Salah, groundwater, drilling, physico-chemical analysis, water classification, statistical analysis

Summary :

The In Salah region is characterized by an arid climate. Indeed groundwater are considered the main source for the satisfaction of needs and agricultural supply drinking water to the population.

The purpose of this work is to characterize the groundwater of the In Salah region. To this effect, we are based on a series of measurements of physico-chemical analysis of groundwater In-Salah, made by specialized agencies on 46 infill drilling in continental allowed to characterize the chemistry of groundwater for their use in drinking water supply and irrigation

The evaluation of the hydro-chemical quality with Multidimensional analysis (PCA) shows that the water quality of the In Salah region moved it to poor whose salinity is too high recommended to use in the supply drinking that after passing through s treatment plant and unusable in agricultural practice for tolerant crops or after practice intense leaching to ground. water