

CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Introduction

Les analyses physico-chimiques des eaux de la nappe de la région étudiée ont permis d'acquérir un certain nombre de paramètres habituellement utilisés pour l'estimation de la qualité des eaux d'irrigation: la salinité (traduite par la conductivité électrique), le RSC (Résiduel Sodium Carbonate), le SAR (Sodium Adsorption Ratio ou indice d'adsorption du sodium, aussi appelé "pouvoir alcalinisant") et les concentrations des éléments chimique sont regroupées dans le tableau ci-après :

III.1.1. Résultats des paramètres mesurés sur terrain

Tableau n°17: Résultats des paramètres mesurés sur terrain

Paramètres Forages	Paramètres physiques		
	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T($^{\circ}\text{C}$)	PH
F1	3120	21.8	6.87
F2	2910	23.2	6.50
F3	1870	23.5	6.24
F4	1729	23.2	6.73
F5	1646	21.9	7.59
F6	1332	21.6	6.93
F7	1094	22.2	8.10
F8	3041	21.8	7.75
F9	1085	22.6	7.54
F10	1666	22.1	7.63
F11	2510	22.6	6.31
F12	1345	23	7.48
F13	1337	28.5	6.11
F14	1314	22.7	7.66
F15	934	20	7.18

III.1.2. Résultat des paramètres mesurés au laboratoire

Tableau n°18 : Résultat des cations

Paramètre N° de forage	Les cations							
	Ca^{2+}		Mg^{2+}		Na^+		K^+	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
F1	312	15.6	189	15.55	133	5.78	4.8	0.12
F2	248	12.4	141	11.60	217	9.43	3.6	0.09
F3	176	8.8	107	8.80	190	8.26	3.6	0.09
F4	176	8.8	107	8.80	250	10.87	1.2	0.03
F5	153	7.65	98	8.06	170	7.39	3.8	0.09
F6	128	6.4	87	7.15	96	4.17	5	0.13
F7	112	5.6	77.76	6.39	60	2.60	5.5	0.14
F8	256	12.8	156	12.83	45	1.95	7	0.17
F9	120	6	77	6.33	102	4.43	4.9	0.12
F10	139	6.95	100	8.22	170	7.39	4	0.10
F11	420	21	155	12.75	140	6.08	4.5	0.12
F12	152	7.6	93	7.65	225	9.78	3	0.08
F13	122	6.1	77	6.33	81	3.52	5.4	0.14
F14	152	7.6	102	8.39	370	16.09	1	0.03
F15	96	4.8	90	7.40	233	10.13	2	0.05

Tableau n°19 : Résultat des anions

Paramètre N° de forage	Les anions											
	Cl^-		SO_4^{2-}		NO_3^-		HCO_3^-		NO_2^-		CO_3^{2-}	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/L	mg/l	meq/l
F1	177	4.99	840	17.5	36	0.58	488	8	00	00	00	00
F2	176	4.96	950	19.8	56	0.90	305	5	00	00	00	00
F3	118	3.32	720	15	22	0.35	341	5.59	00	00	00	00
F4	118	3.32	700	14.6	19	0.30	305	5	00	00	00	00
F5	165	4.65	510	10.6	26	0.41	366	6	00	00	00	00
F6	88	2.48	600	12.5	12	0.19	414	6.78	00	00	00	00
F7	59	1.66	400	8.3	4	0.06	268	4.39	00	00	00	00
F8	118	3.32	900	18.7	45	0.72	427	7	00	00	00	00
F9	106	2.99	510	10.6	6	0.09	305	5	00	00	00	00
F10	177	4.99	520	10.8	23	0.37	488	8	00	00	00	00
F11	171	4.82	900	18.7	29	0.46	144	2.36	00	00	00	00
F12	177	4.99	492	10.2	16	0.25	244	4	00	00	00	00
F13	218	6.14	450	9.4	4	0.06	450	7.37	00	00	00	00
F14	312	8.78	450	9.4	20	0.32	244	4	00	00	00	00
F15	377	10.62	547	11.9	20	0.32	547	8.96	00	00	00	00

Tableau n°20 : Résultat des autres paramètres calculés

	Dureté totale (F°)	TAC (F°)	TA (F°)	Salinité (mg/l)	SAR (meq/l)	Résidu sec (mg/l)
F1	156	40	00	2652	1.70	1000
F2	120	25	00	2473.5	2.72	2205
F3	88	28	00	1589.5	1.72	1417
F4	88	25	00	1469.65	3.67	1310
F5	79	30	00	1399.1	2.63	1264
F6	68	34	00	1132.2	1.60	1009
F7	60	22	00	929.9	1.06	751
F8	128	35	00	2584.85	0.54	2089
F9	62	25	00	922.25	1.78	833
F10	76	40	00	1416.1	2.75	1279
F11	124	20	00	2133.5	1.50	1902
F12	78	20	00	1143.25	3.66	1032
F13	62	30	00	1136.4 5	1.41	1013
F14	80	20	00	1116.9	5.70	1009
F15	34		00	793.9	4.11	642

III.2. Les caractéristique physico chimique :

Les résultats détaillés des analyses physico-chimiques des eaux d'irrigation des forages sont illustrés par les figures suivantes :

1. La température

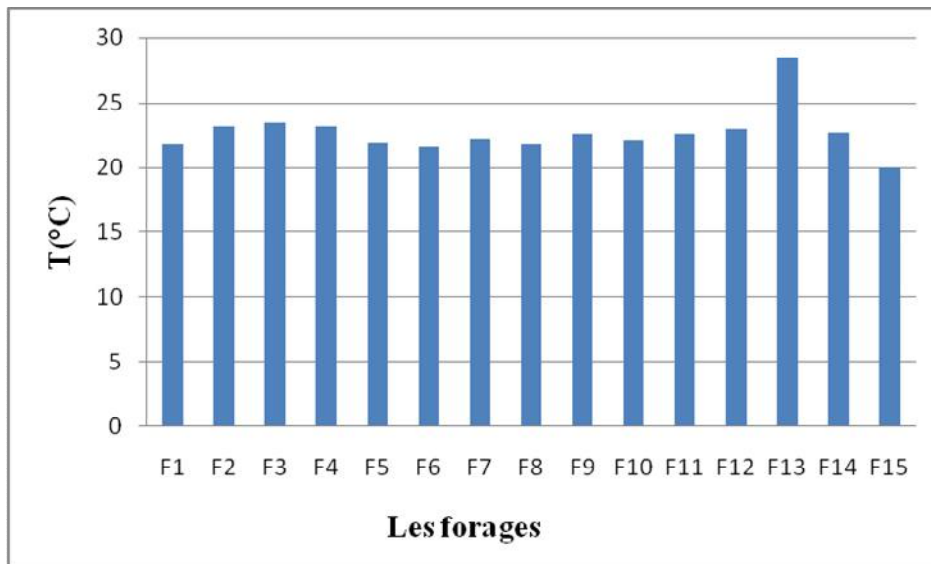


Fig. n°16 : Variation de la température des eaux de la plaine de M'Sila.

La figure 16 montre que les valeurs de la température mesurées des différents points d'eau de secteur d'étude est variée entre 20°C et 28.5°C au niveau du forage F15 et F13 respectivement. La température de ces eaux est inférieure à 25°C, considérée comme valeur limite indicative fixée pour les eaux destinées à l'irrigation des cultures selon grille standard multi usage d'appréciation globale de la qualité des eaux , sauf pour le forage F13, ce qui traduit l'appartenance des nitrates.

1. La conductivité électrique

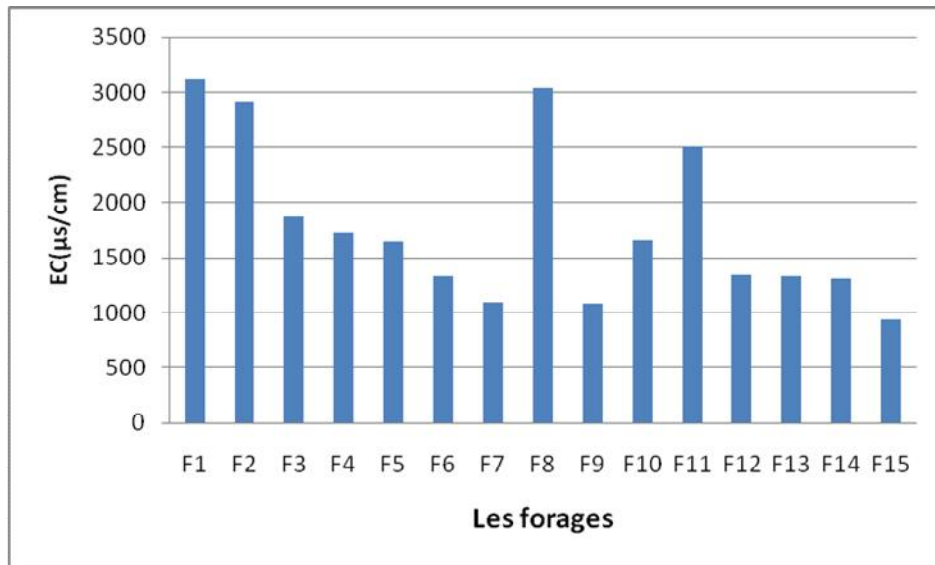


Fig. n°17 : Variation de la conductivité électrique des eaux de la plaine de M’Sila.

Le tableau 17 et la figure 17 montrent que la majorité des eaux de la plaine de M’Sila pendant la campagne du prélèvement ont une forte conductivité dans le forage F1 avec 3120 µS/cm, donc un degré de minéralisation élevée. Ces valeurs restent supérieures à la limite des normes d’irrigation Grille standard multi usage d’appréciation globale de la qualité des eaux fixées par la CEE ($\sigma < 1500 \mu\text{S/cm}$).

3. Le pH

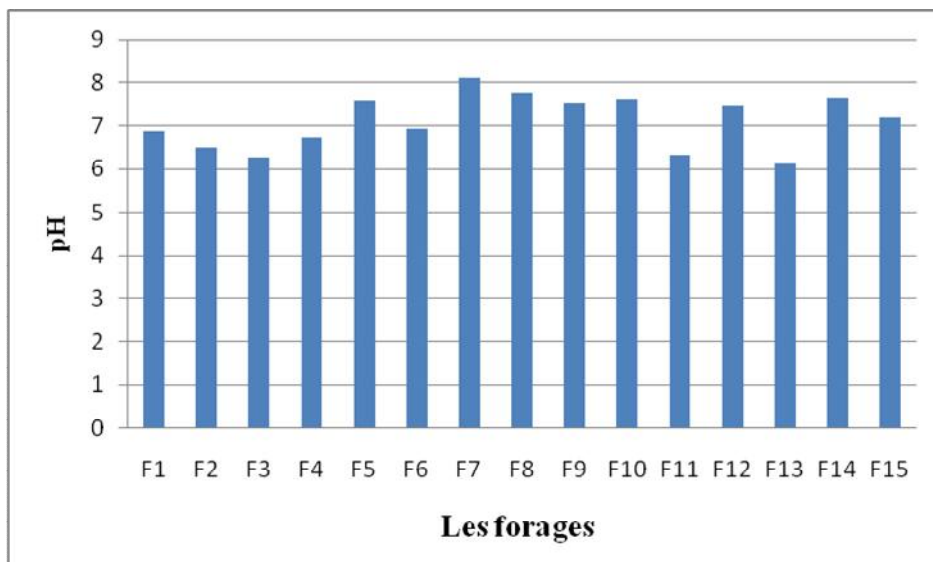


Fig. n° 18 : Variation du pH des eaux de la plaine de M’Sila.

La valeur moyenne calculée du PH mesuré sur le terrain au niveau des forages sur 15 échantillons est de 7.1, avec un minimum de 6.2 au forage F13, et un maximum de 8.1 au forage F7; et selon

le norme grille standard multi usage d'appréciation globale de la qualité des eaux le pH qui inférieure à 6 est adapté pour l'irrigation ce qui reflète un caractère basique des eaux de la région.

4- La dureté totale

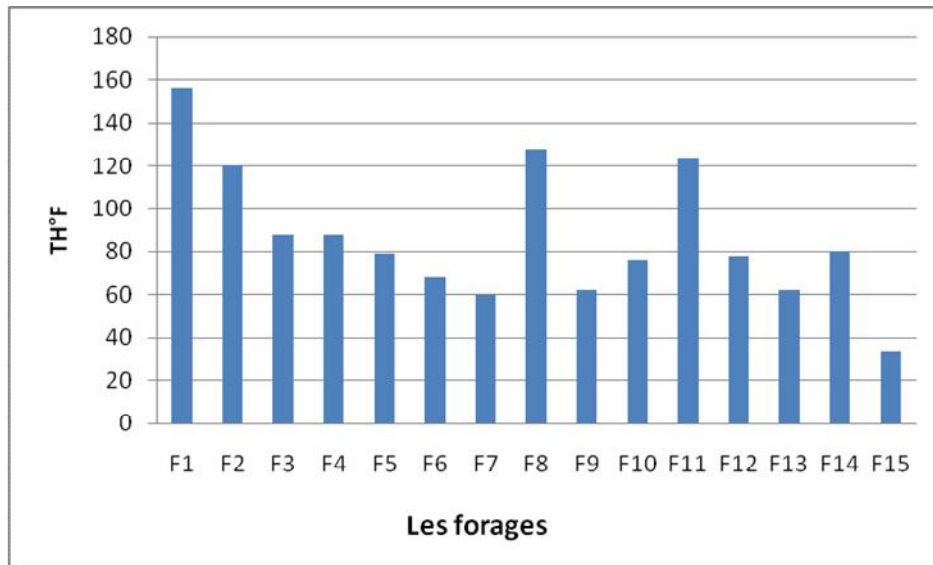


Fig. n° 19: Variation de la dureté totale des eaux de la plaine du M'Sila.

Selon les résultats indiqués au tableau n°20 .et la représentation à la figure n° 19 , les valeurs de la dureté totale calculée s'étalent entre 34°F et 156°F indiquent que les eaux de la nappe Mio-Plio-Quaternaire sont des eaux dures à très dures d'après les normes internationales voire

l'annexe 14

5-Calcium

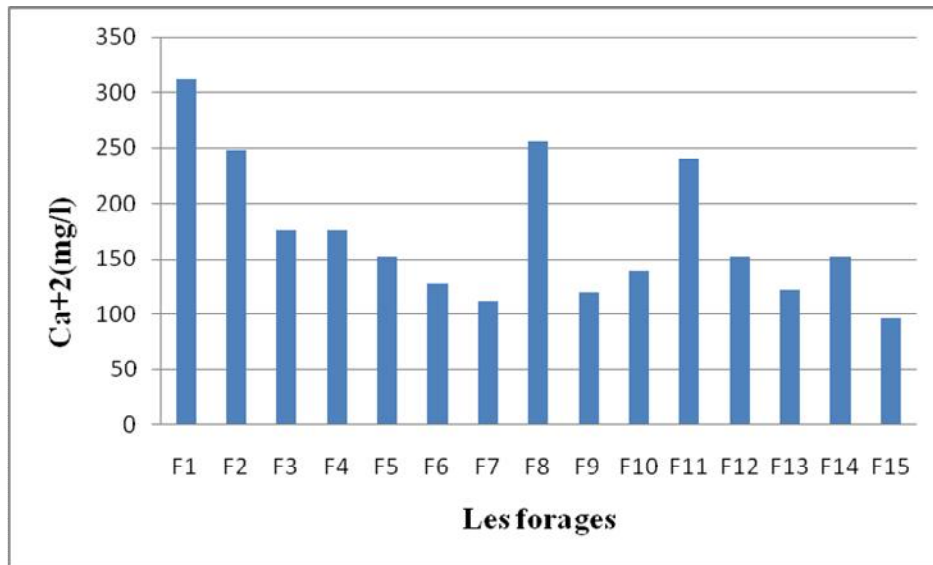


Fig. n°20 : Variation des concentrations en Calcium des eaux de la plaine de M'Sila.

Les teneurs de calcium varient entre 96 mg/l au forage F15 et 312 mg/l au forage F1. Les valeurs des forages qui inférieure 300 mg/l est adapté à l'irrigation voir l'annexe 13. L'apport du calcium est assuré au Nord par les entrées qui donnent des teneurs élevées car c'est le foyer des infiltrations et du lessivage, par contre, une fois les eaux sont dans la nappe, les vitesses d'écoulements sont faibles, les eaux se mélanges avec l'ensemble des réserves de l'aquifère et se diluent dans ces réserves.

6-Magnésium

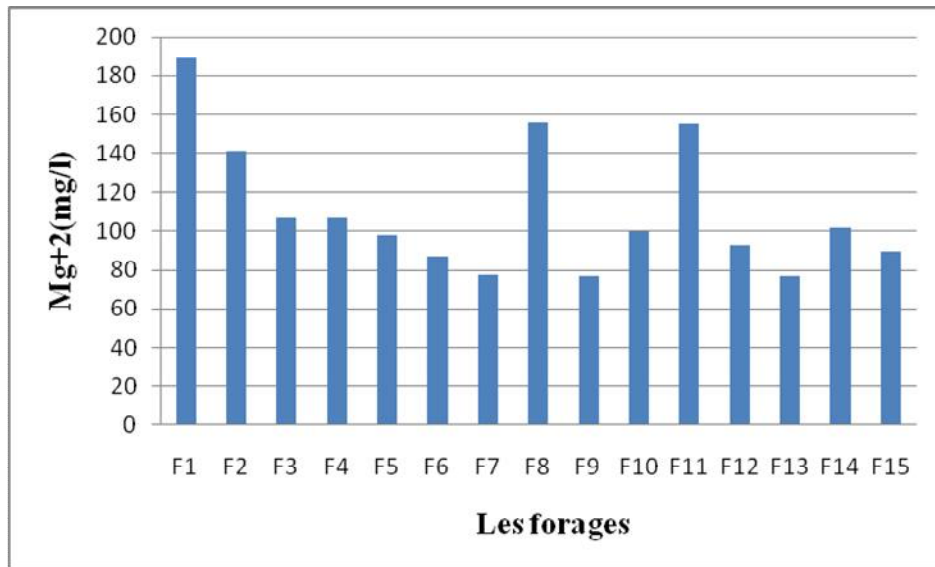


Fig. n°21: Variation des concentrations en Magnésium des eaux de la région d'étude.

La teneur minimale du magnésium est enregistrée au forage F9 avec 77 mg/l, et la teneur maximale est enregistrée au forage F1 avec 189 mg/l. les valeurs des forages qui inférieure 300 mg/l est adapté à l'irrigation viore l'annexe 13. Le magnésium provient en partie du flanc Sud des monts du Hodna à partir des calcaires dolomitiques du Barrémien et de l'Aptien.

7-Chlorures

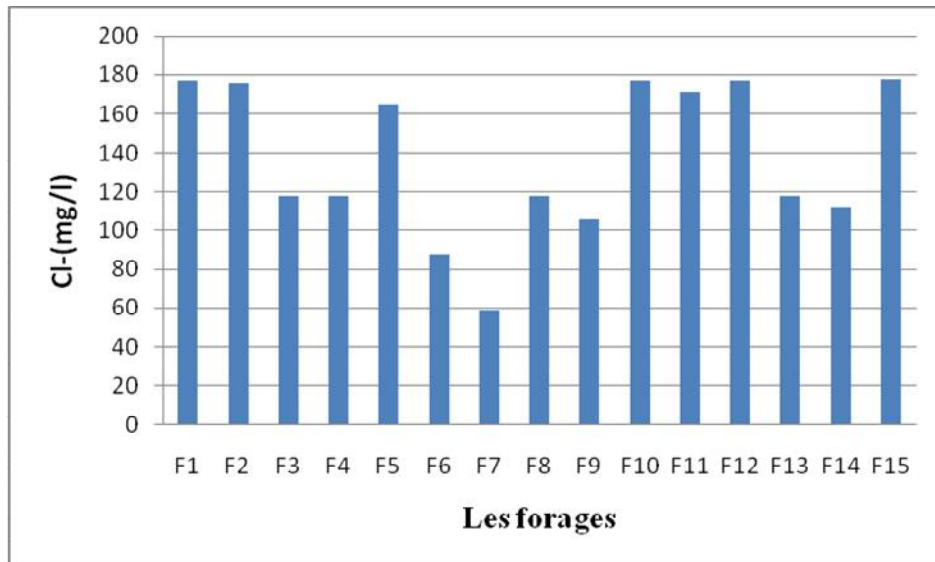


Fig. n°22 : Variation des concentrations en Chlorure des eaux de la région d'étude.

Les valeurs de Cl^- varient entre 59 mg/l (F7) et 377 mg/l (F15). Les fortes teneurs sont centrées au Sud. Le Cl^- provient d'une intrusion des eaux salées du Chott El Hodna à partir de la nappe phréatique (mélange des eaux des deux nappes).

Les chlorures dans les eaux d'irrigation représentent un risque potentiel pour les cultures et pour le sol lorsque ses valeurs dépassent une concentration de 300 mg/l. voir l'annexe 13.

8-Les sulfates

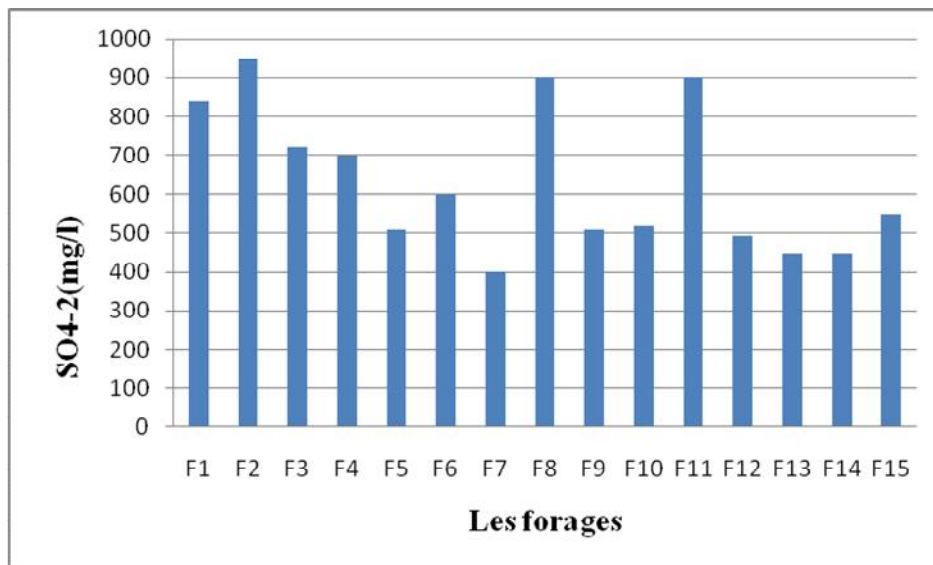


Fig. n°23.: Variation des sulfates des eaux de la région d'étude.

Les résultats des analyses chimiques, donnent des valeurs qui varient entre 400 mg/l au forage F7 et une valeur de 950 mg/l au forage F2. tous les valeurs dépasse 300 mg/l donc no adapté à l'irrigation viore l'annexe 13. D'après ces résultats, nous distinguons la zone Nord qui est caractérisée par des teneurs élevées, qui sont supérieures à 750 mg/l en liaison avec le les entrées qui fournissent ce minéral à partir des niveaux gypseux du Lutétien et des niveaux argileux de l'Oligocène au Sud des monts du Hodna, et puis les eaux mélanges avec l'ensemble des réserves de la nappe qui sont lui diminués leur concentration.

9-Les bicarbonates

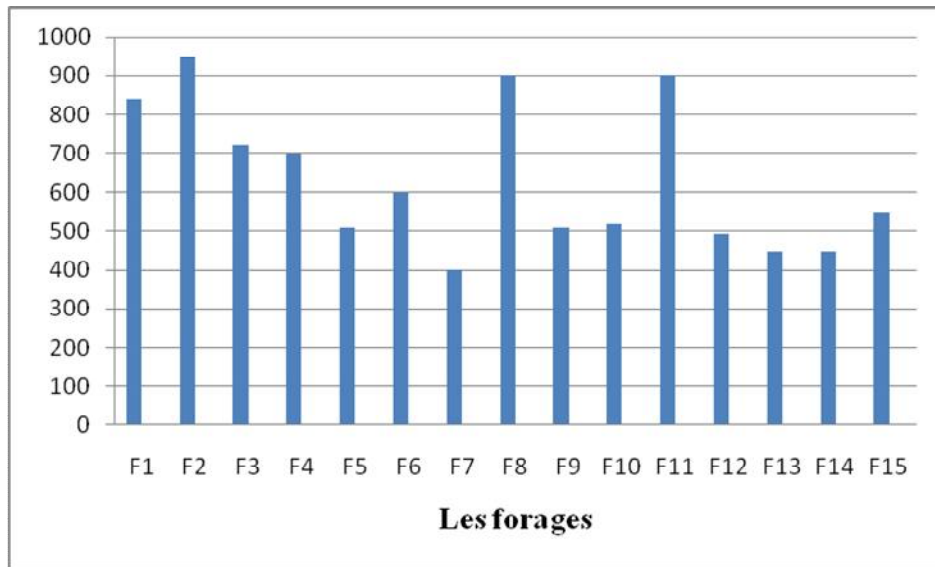


Fig. n°24 : Variation des concentrations en carbonates et bicarbonates des eaux de la plaine de M'Sila.

Les teneurs des eaux dans la plaine de M'Sila en bicarbonates varient entre 400 mg/l (F7) et 950 mg/l (F2). Les fortes teneurs se localisent dans la partie Nord, alors que les faibles teneurs se trouvent à l'opposé, dans la zone Sud. Les bicarbonates proviennent en partie du flanc Sud des monts du Hodna (calcaires à silex de l'Yprésien, calcaires noduleux de l'Albien inférieur).

Les bicarbonates dans les eaux d'irrigation représentent un risque sérieux pour les cultures lorsque les concentrations dépassent les 500 mg/l et lorsque l'opération d'irrigation se fait par un système d'aspersion.

10-les résidus secs

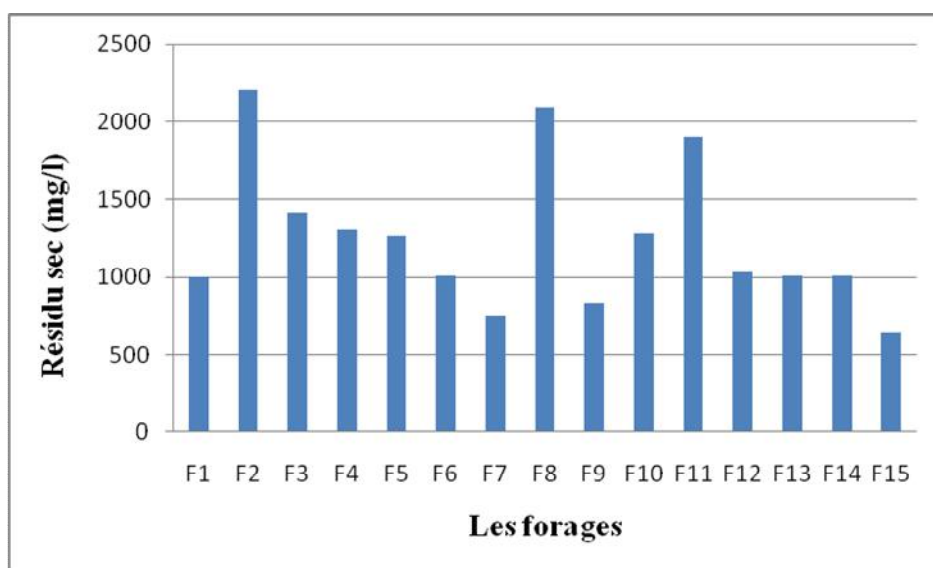


Fig. n°25 : Variation du résidu sec des eaux de la plaine de M'Sila.

Les résultats du résidu sec des eaux de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire montrent des concentrations qui s'étalent entre 2205 mg/l au forage F2 et 642 mg/l au F15, donc c'est valeurs dépasse pas 2500 mg/l qui adapté à l'irrigation voire l'annexe 13. Ces concentrations dépendent au temps du contact des eaux avec l'ensemble des formations lithologiques de l'aquifère.

11-Les nitrates et les nitrites

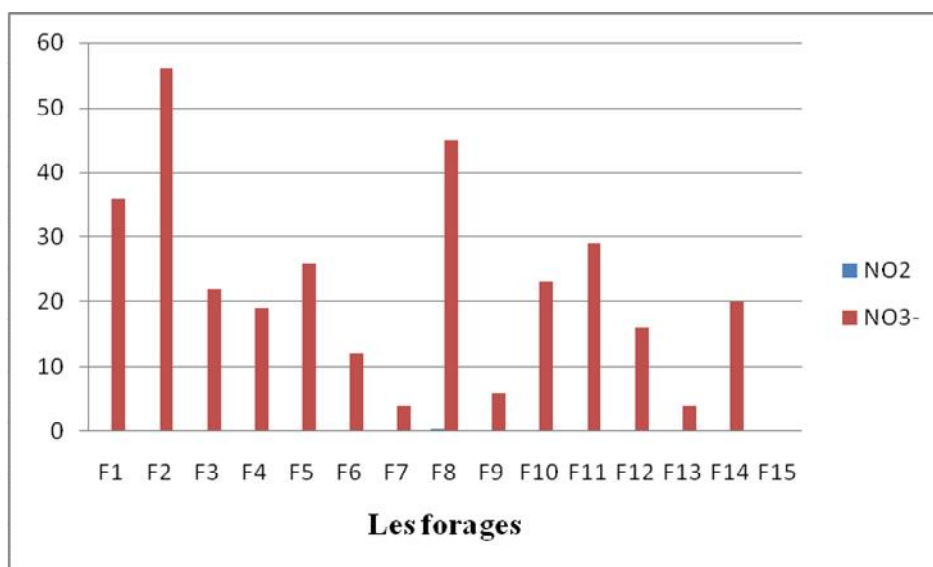


Fig. n°26 : Variation des nitrates et des nitrites dans les eaux de secteur d'étude.

L'examen des résultats des nitrates dans la figure ci-dessus montre que les concentrations dépassent la norme fixée par la grille standard (30 mg/l) que pour les eaux des forages F1, F2 et F8. Ils semblent que les zones les plus affectées sont des régions à forte activité agricole en plus de l'origine urbaine à partir des eaux usées de la ville de M'Sila.

Remarque :

Il est reconnu que l'excès des nitrates dans les eaux de consommation provoque la méthémoglobinémie chez les nourrissons appelée également la maladie bleue.

12- La salinité

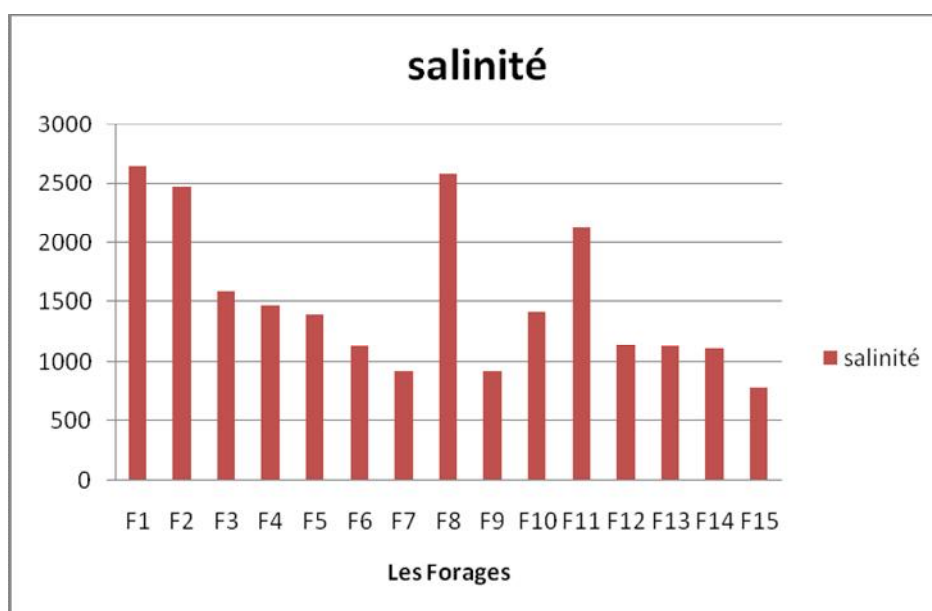


Fig. n°27: Variation de la salinité des eaux de la plaine de M'Sila.

Les valeurs de la salinité mesurées dans l'ensemble des stations sont enregistré dans le tableau n°20 et d'après la figure n° 27 représentées les résultats on à une valeur maximale dans le forage 1 avec 2652 ; et la valeur minimale qui enregistré dans le forage 15 avec 793.9.

13- le sodium

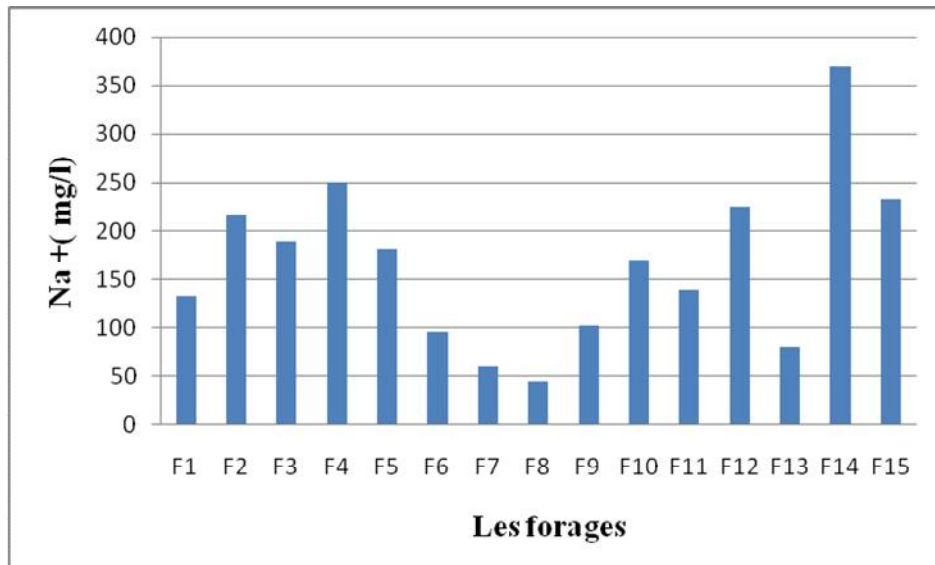


Fig. n°28 : Variation du sodium pour les eaux de secteur d'étude.

Les concentrations du sodium des eaux de la région d'étude varient entre 45 mg/l au forage F8 et 370 mg/l au forage F14. La répartition de cet élément montre une augmentation des concentrations au Sud de la zone d'étude. Cette élévation est due à la présence des argiles gypseuses et des évaporites.

14- Le potassium

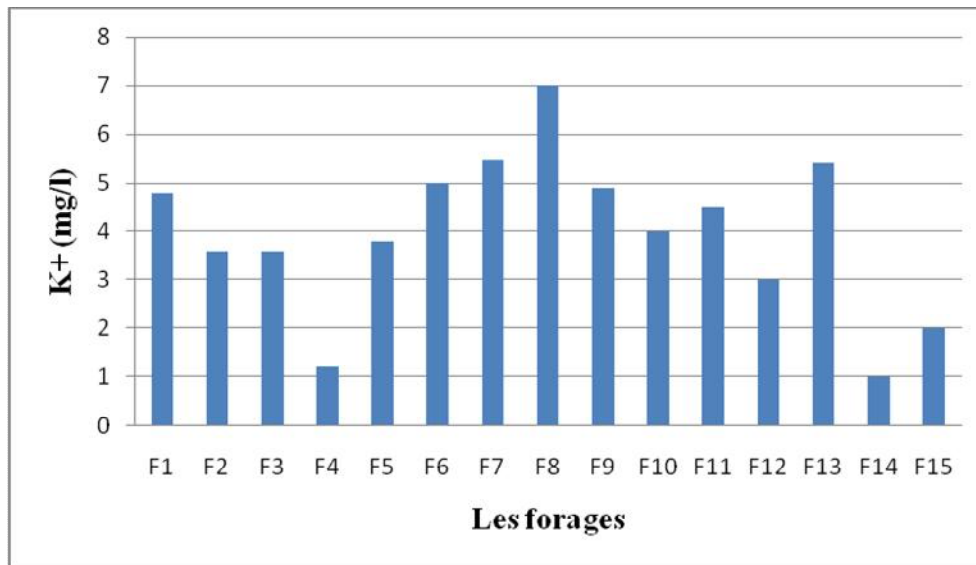


Fig. n°29 : Variation des concentrations de potassium dans les eaux de la plaine de M'Sila.

Les teneurs en potassium montrent un maximum au forage F8 avec 7 mg/l et un minimum au forage F14 avec 1 mg/l. Le potassium est du probablement des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques retrouvés dans les eaux usées agricoles.

III.3. Classification des eaux

III.3.1. Les faciès chimiques

III.3.1.1. Formule caractéristique de STABLER

On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant (voir annexe 15). Les résultats obtenus permettent de distinguer les faciès qui figurent dans le tableau n°21 L'examen de ce tableau montre que les eaux souterraines de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire destinée à l'irrigation sont des eaux sulfatées. Cette famille représente respectivement 46.68% pour le faciès sulfatée calcique et 26.66% pour les faciès sulfatée sodique et magnésienne.

Tableau n°21 : Classification des eaux souterraines selon STABLER

Campagne chimique	Famille des eaux	Faciès chimique	Pourcentage	
Avril 2016	Sulfatée	Sulfatée magnésienne	46.68%	100%
		Sulfatée calcique	26.66%	
		Sulfatée sodique	26.66%	

D'après ces résultats, on remarque une dominance de la famille des sulfates qui semble être liées à une origine géologique ou à la forte évaporation. Tantôt ces sulfates qui accompagnent le magnésium ou le calcium tantôt le sodium.

III.3.1.2. Diagramme de PIPER

La présentation des analyses chimiques des eaux souterraines sur ce type de diagramme (Fig.30,31,32) permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux souterraines. Le tableau n°22 montre que les eaux de la plaine de M'Sila présentent deux familles dominantes sont :

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

Tableau n°22 : Classification des eaux souterraines : différentes compagnes selon PIPER

Campagne chimique	Famille des eaux	Pourcentage
Avril 2016	Chlorurée sulfatée calcique et magnésienne	93.34%
	Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique	06.66%

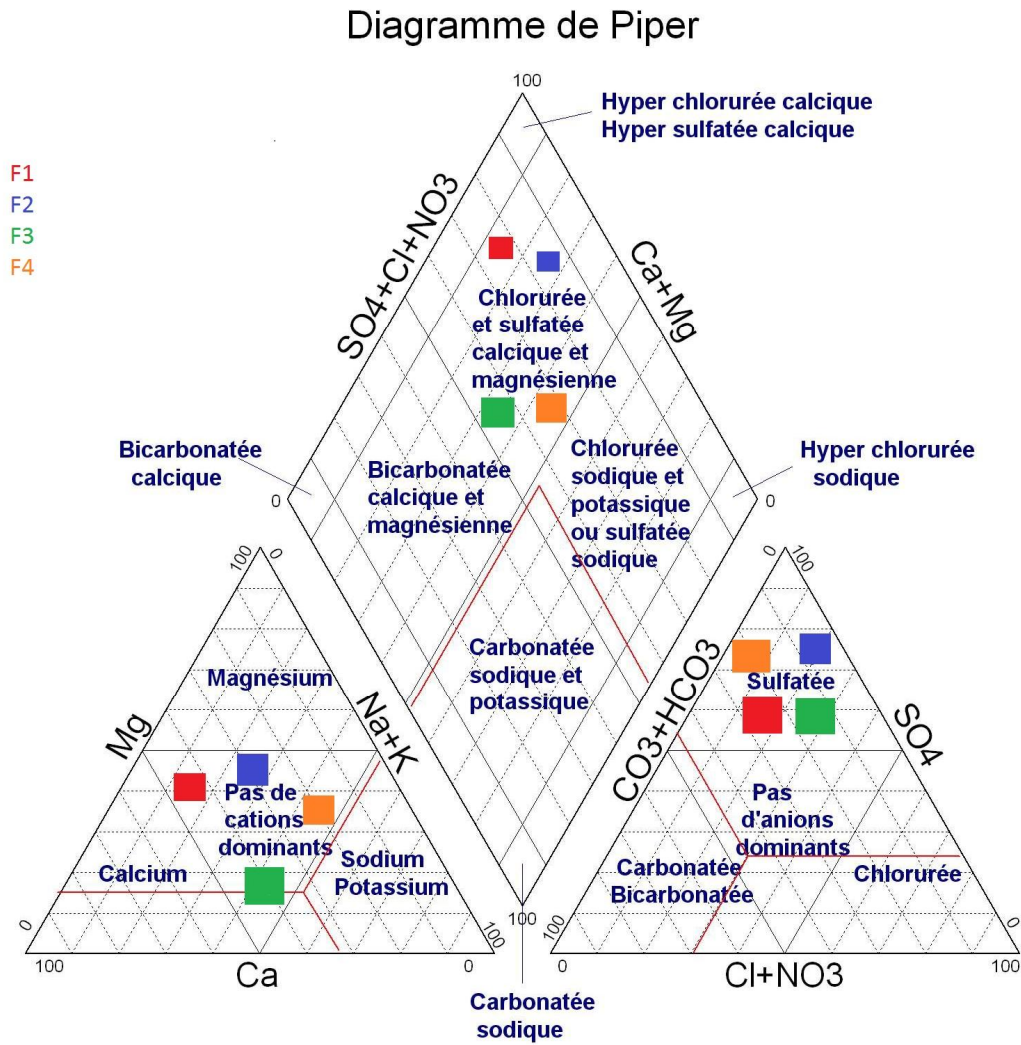


Fig. n° 30: Classification des eaux d'irrigations des stations F1.F2.F3.F4 de M'Sila selon la méthode de PIPER.

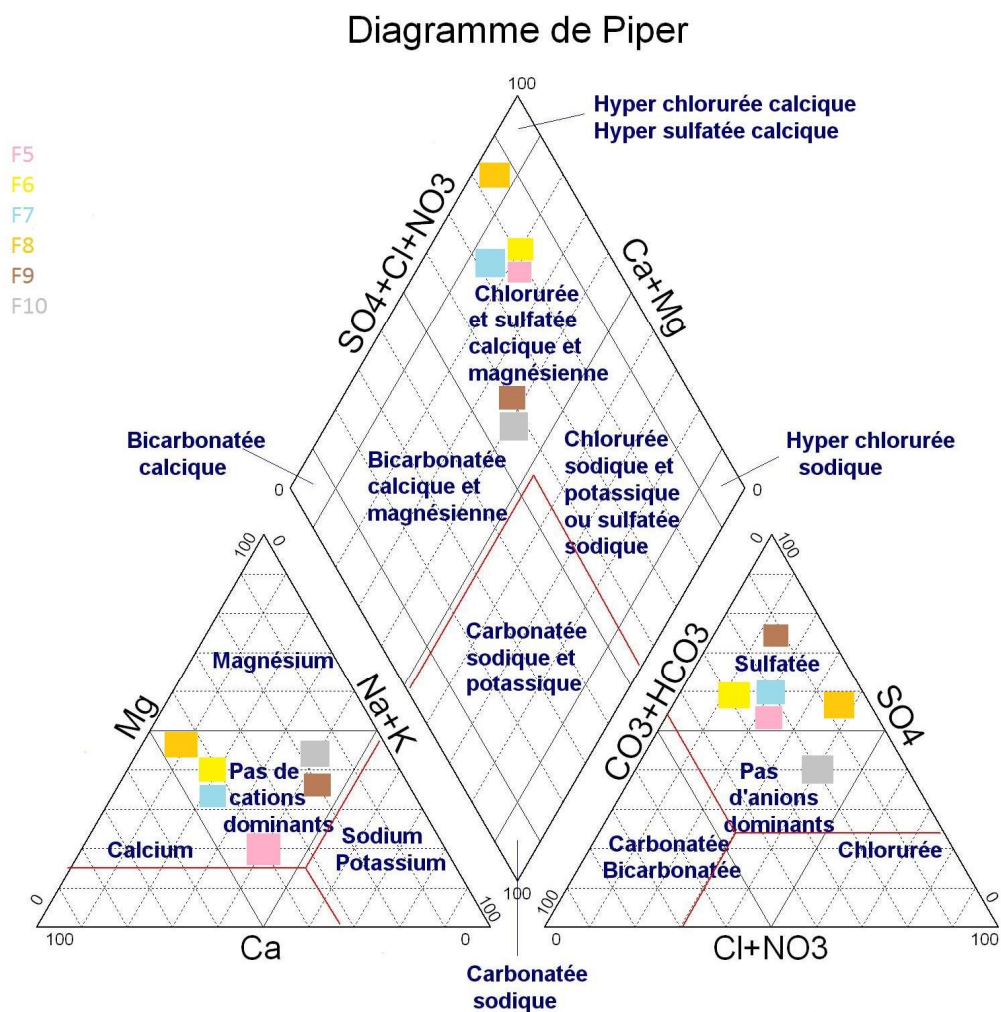


Fig. n°31: Classification des eaux d'irrigations des stations F5.F6.F7.F8.F9.F10 de M'Sila selon la méthode de PIPER.

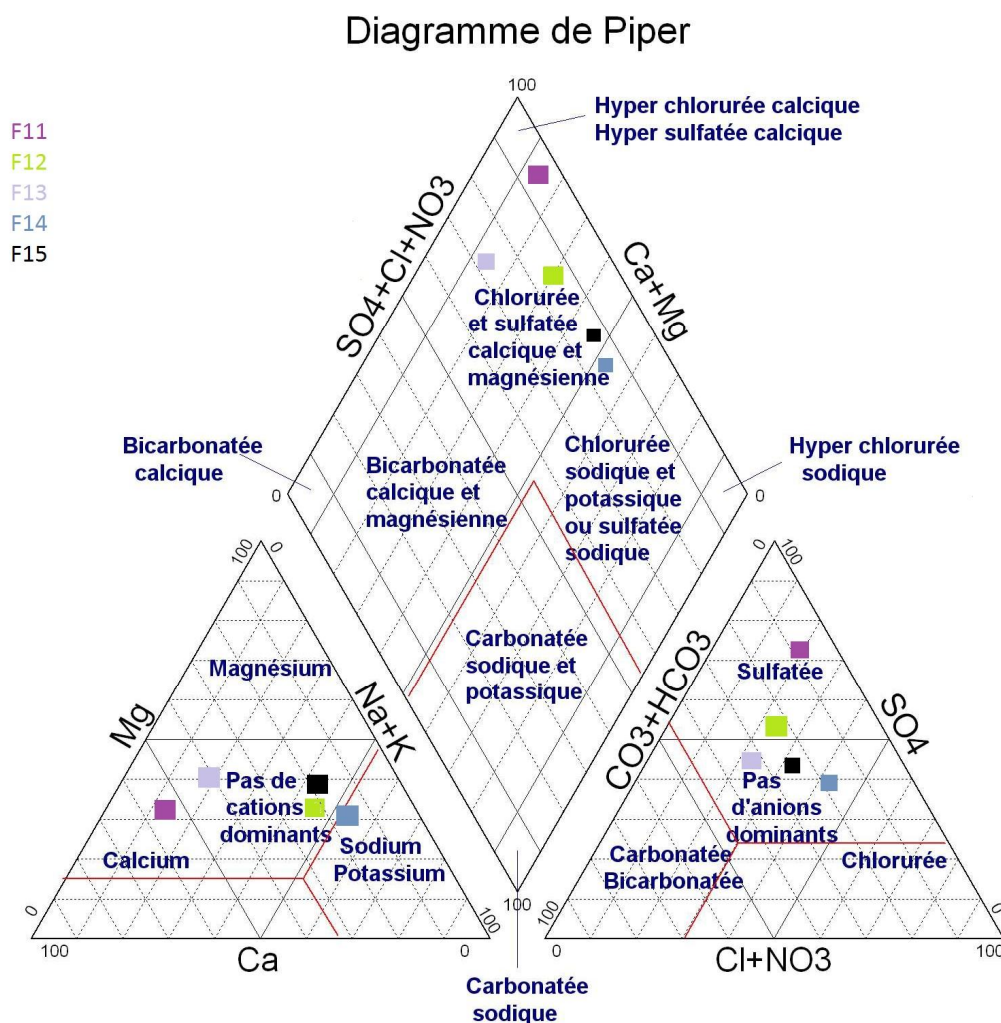


Fig. n°32: Classification des eaux d’irrigations des stations F11.F12.F13.F14.F15 de M’Sila selon la méthode de PIPER.

III.3.1.3. Diagramme de SCHOELLER – BERKALOFF

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

Les diagrammes logarithmiques (Fig.33.34.35.36) ont permis d’identifier les grandes familles chimiques suivantes (tableau n°23) :

Tableau n°23 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de SCHOELLER-BERKALOFF

Campagne chimique	Famille des eaux	Faciès chimique	Nombre	Pourcentage
Avril 2016	Sulfatée	Sulfatée calcique	15	100 %

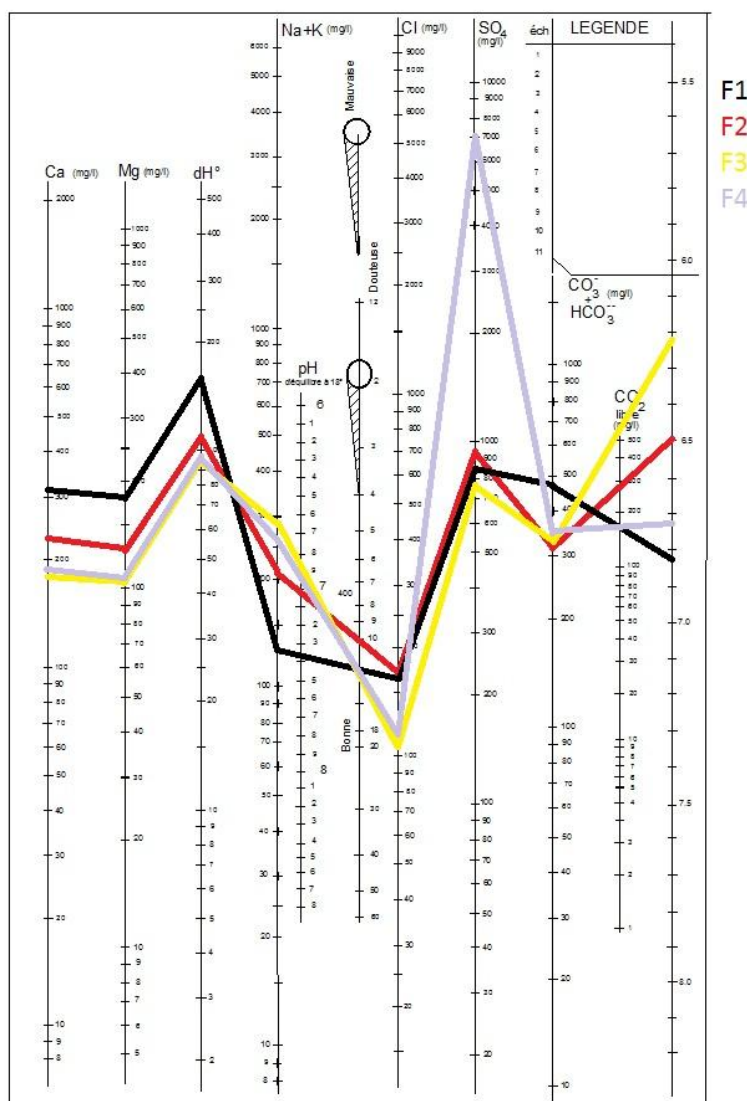


Figure 33 : Classification des eaux d'irrigation des stations F1.F2.F3.F4 de M'Sila selon SCHOELLER et BERKALOFF

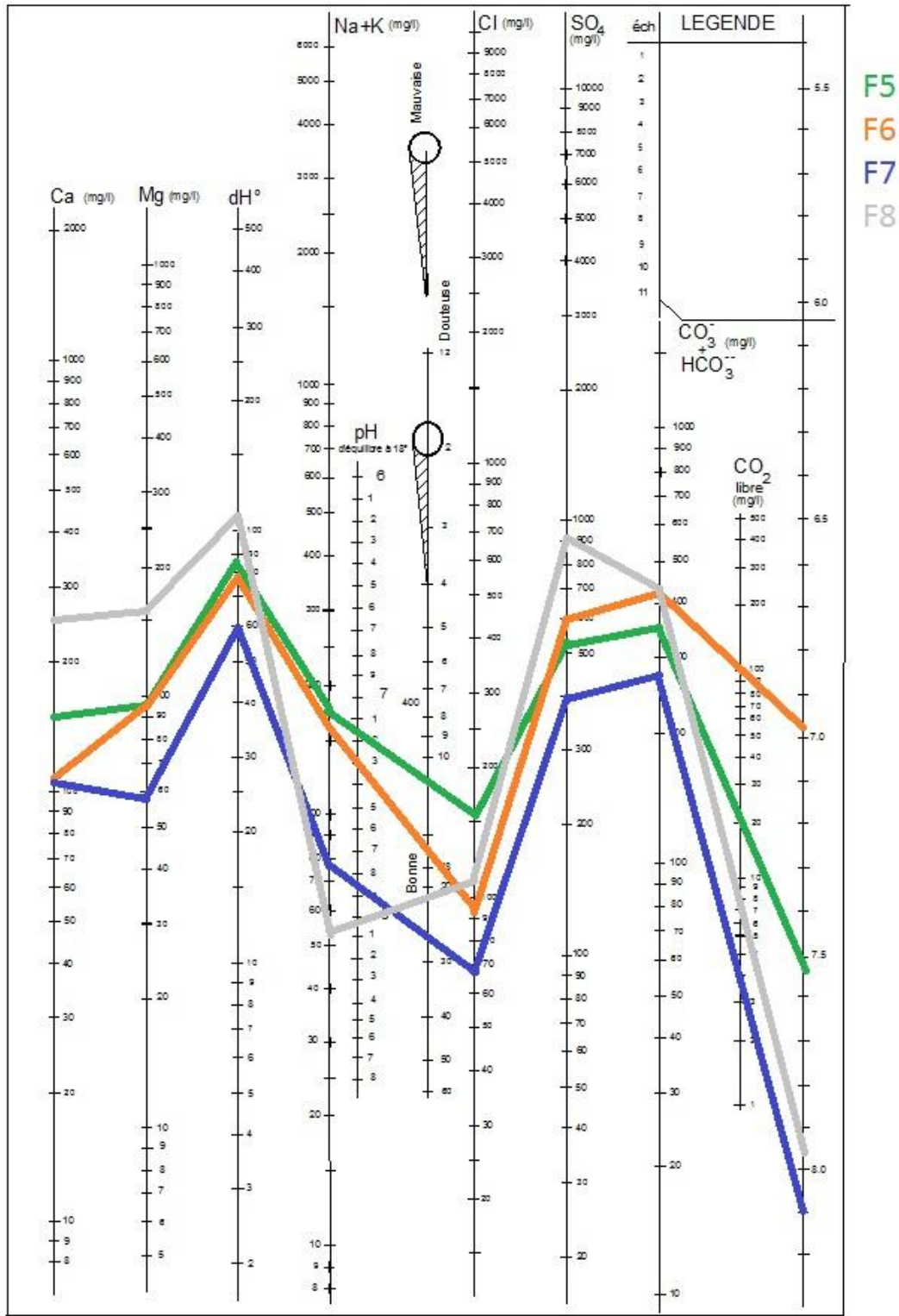


Fig. n°34 : Classification des eaux d'irrigation des stations F5.F6.F7.F8 selon SCHOELLER et BERKALOFF

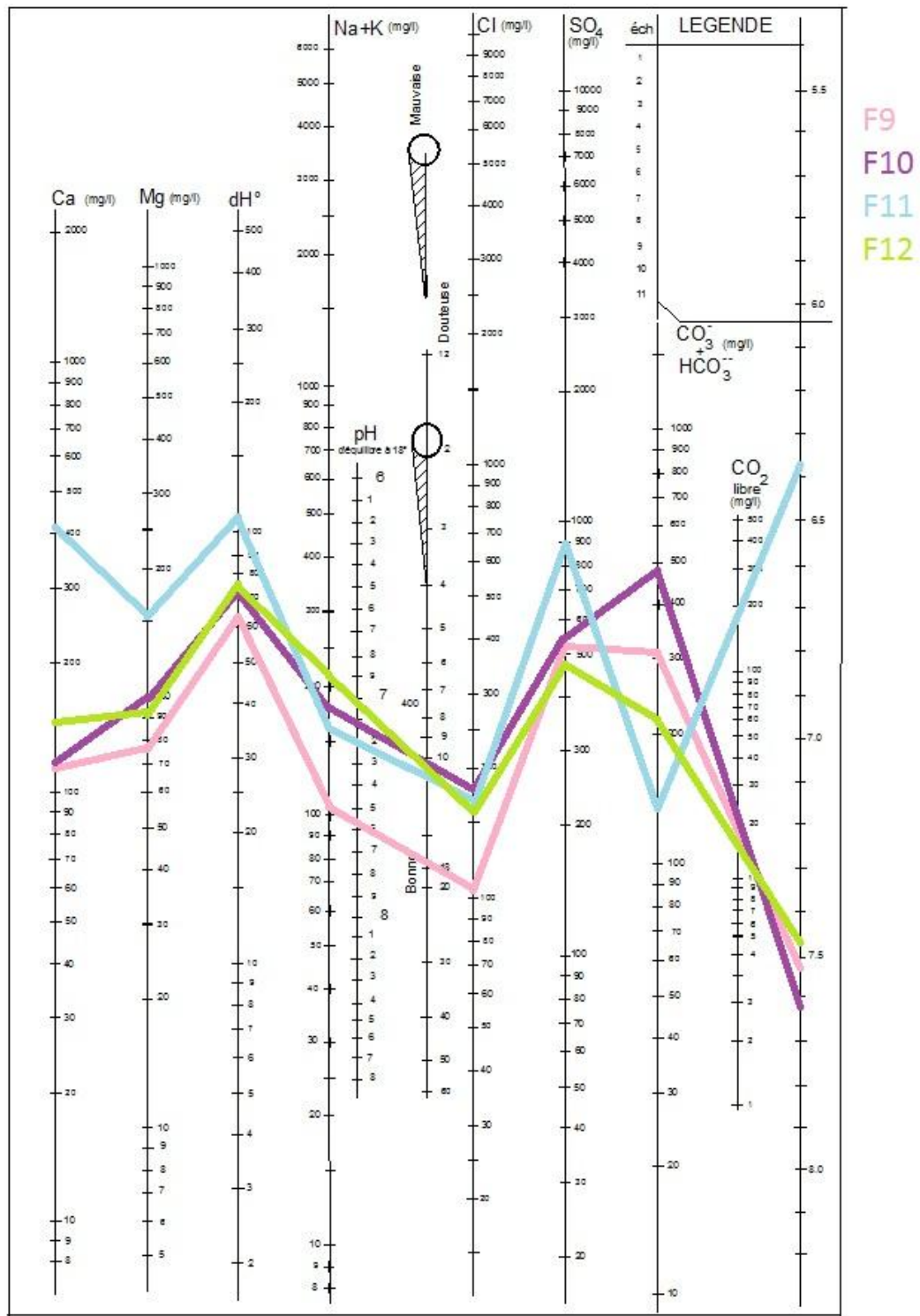


Fig. n° 35 : Classification des eaux d'irrigation des stations F9.F10.F11.F12 selon SCHOELLER et BERKALOFF

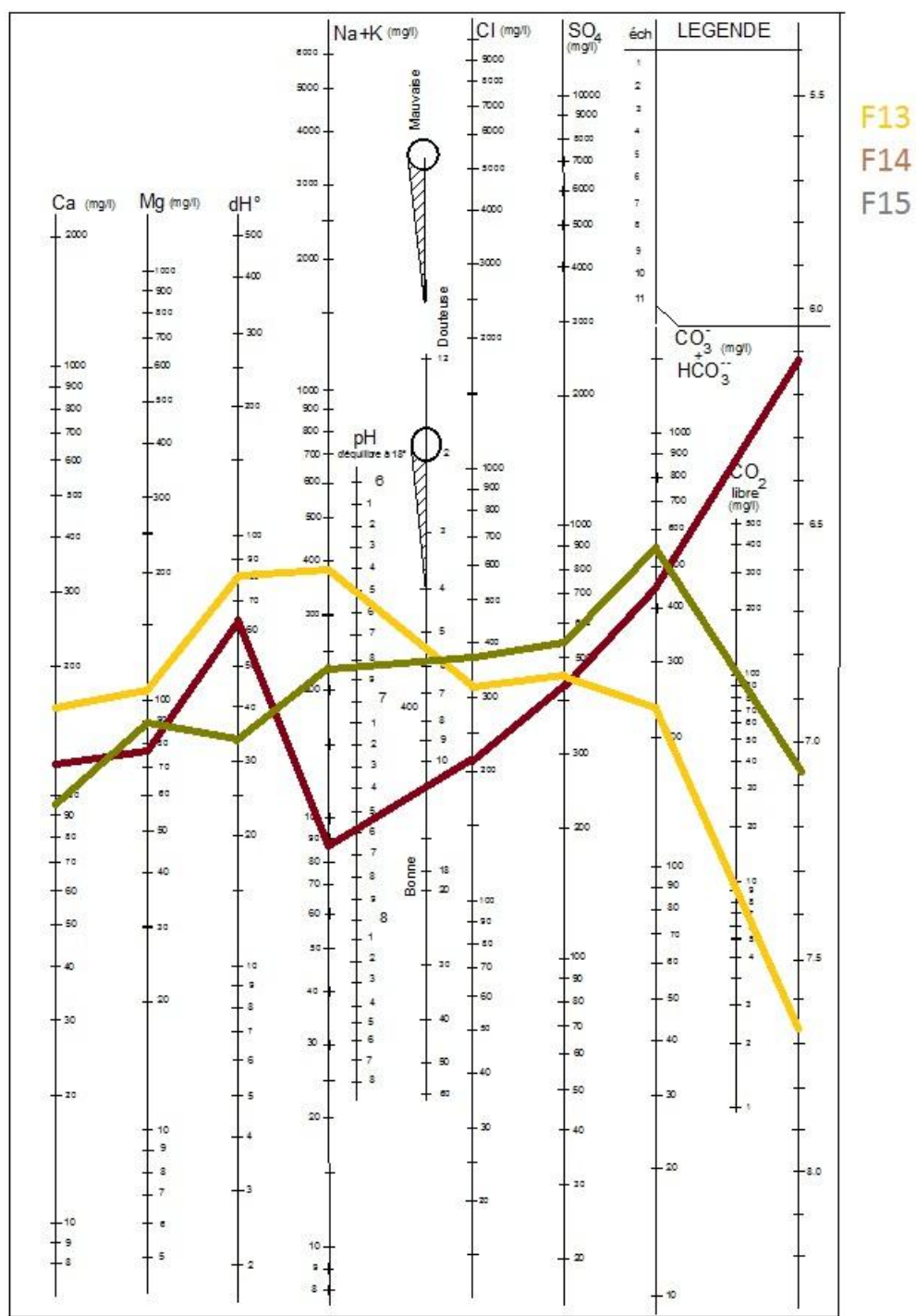


Fig. n° 36 : Classification des eaux d'irrigation des stations F13.F14.F15 de M'Sila selon SCHOELLER et BERKALOFF

A première vue, on remarque une dominance des sulfates qui semble être liées à la géologie en particulier les grès argileux gypsifères de l'Oligocène au Nord de la région d'étude ou à la forte évaporation.

III.3.1.4. Diagramme de Richards

Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le S.A.R est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}, \text{ Où tous les éléments sont exprimés en méq/l.}$$

Le tableau n°24 récapitule les résultats obtenus après interprétation de diagramme de Richards (Fig.37).

Tableau n° 24 : Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards

Classes		Pourcentage des points d'eau
		Avril 2016
Admissible	S1C3	73.33 %
Médiocre	S1C4	20 %
Mauvaise	S2C4	06.66 %
Momentanée	S3C4	0 %

La distribution du S.A.R dans l'ensemble de secteur d'étude représente un faible danger d'alcalinité à moyen pour 73 % des échantillons analysés, par contre 27 % de ces derniers peuvent provoquer un danger d'alcalinité du sol.

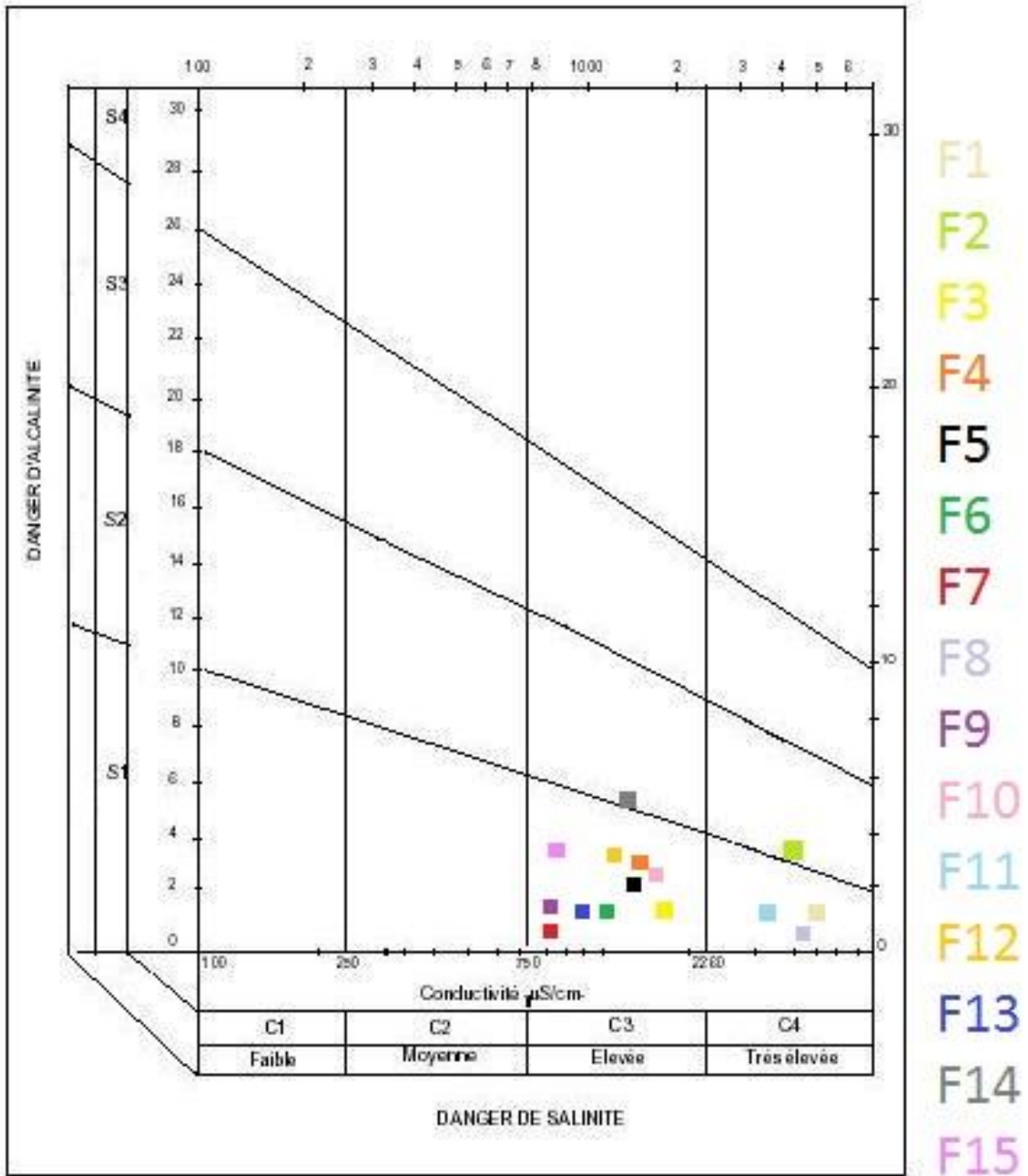


Fig. n° 37: Classification des eaux d'irrigation des trois stations étudiées selon Diagrammes de RICHARDS

A première vue, on remarque une dominance des sulfates qui semble être liées à la géologie en particulier les grés argileux gypsifères de l'Oligocène au Nord de la région d'étude ou à la forte évaporation.

III.3.1.5. Diagramme de Wilcox

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

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

Cette classification définit cinq classes d'eau : Excellente – Bonne – Admissible - Médiocre - Mauvaise. (Fig. n°38). Les résultats du pourcentage du Sodium obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau n°25 : Résultats de l'utilisation du diagramme de Wilcox

Classes	Pourcentage des points d'eau
	Avril 2016
Excellente	0
Bonne	73.34 %
Médiocre	13.33 %
Mauvaise	13.33 %

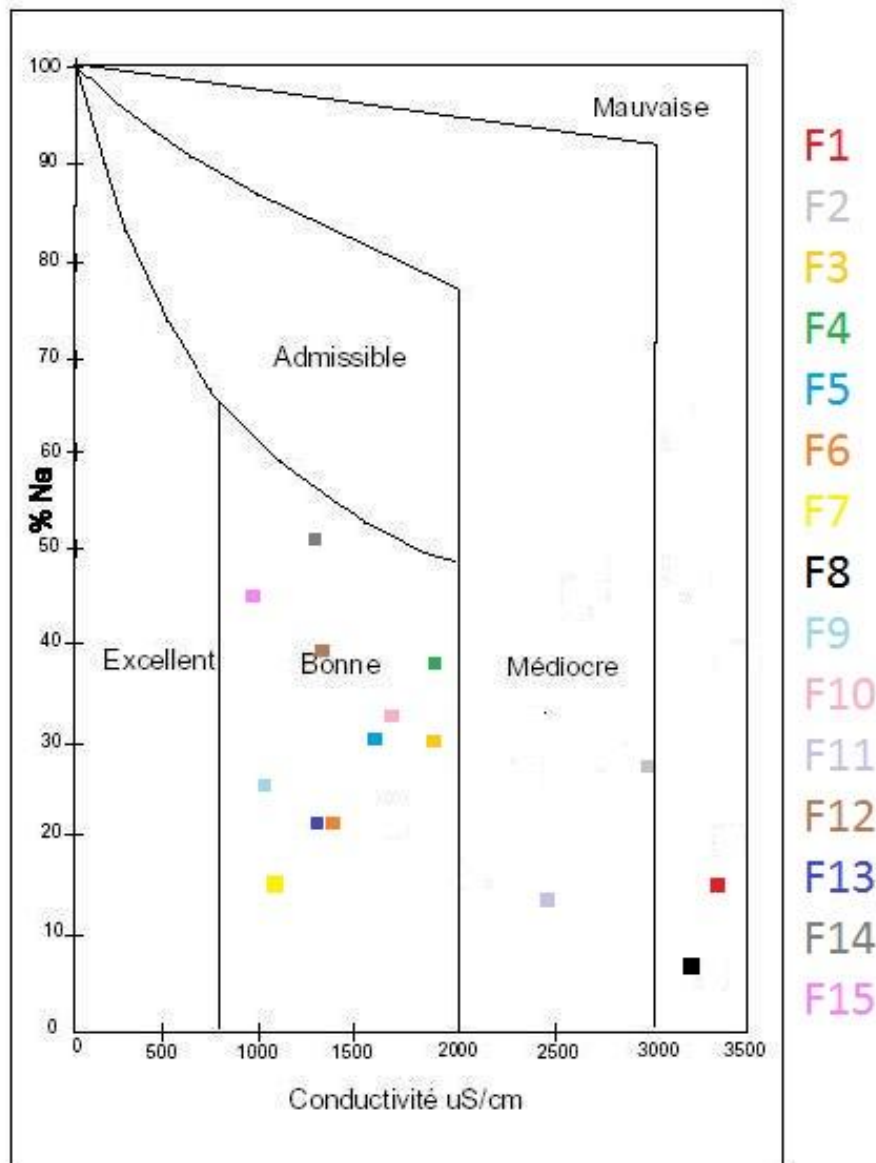


Fig. n°38 : Classification des eaux d’irrigation des trois stations étudiées de selon Diagrammes de WILCOX

D’après le tableau n°25 et la figure n°38, 73.34 % des points d’eau pendant la campagne d’Avril 2016 sont bonnes et 13.33 % des points d’eau sont entre médiocre et mauvaise qualité.

III.3.1.6. Caractère de l'eau

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

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

L'examen du tableau n°26 montre que la majorité des points d'eau de la campagne d'Avril 2016 sont caractérisées par une eau agressive avec 60%. Ceci c'est traduit par une forte corrosion du tubage des forages.

Tableau n°26 :L'agressivité ou l'incrustante de l'eau

Avril 2016	Pourcentages des points d'eau
$\text{pH}_{\text{mesuré}} = \text{pH}_{\text{équilibre}}$	0
$\text{pH}_{\text{mesuré}} > \text{pH}_{\text{équilibre}}$	40 %
$\text{pH}_{\text{mesuré}} < \text{pH}_{\text{équilibre}}$	60%

III.4. APTITUDE A L'IRRIGATION

Par sa qualité chimique l'eau souterraine doit être destinée prioritairement à l'AEP, malheureusement au niveau de la plaine de M'Sila les aquifères sont exploités anarchiquement pour l'irrigation en particulier l'aquifère Mio-Plio-quaternaire. Afin d'estimer l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Pour cela, nous allons utiliser plusieurs méthodes afin de les classer.

III.4.1. Salinité

Selon R. S. AYERS et D. W. WESTCOT (1988) ; quand les eaux d'irrigation sont chargées en sels, ces derniers s'accumulent dans la zone racinaire après que la plante ait prélevé l'eau. Ces sels s'épaississent et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol pour la culture. Les directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Tableau n°20) montrent que :

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

L'examen du tableau n°27 montre que la majorité des points d'eau de la plaine de M'Sila représentent une restriction légère à modérée avec 80 %, et une restriction forte comprenant 20% des points d'eau. En cas d'irrigation avec ces eaux chargées en sels, on peut s'attendre à des chutes de rendements (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988) de certaines cultures pratiquées au niveau de la plaine de M'Sila (Tableau n°28).

Tableau n°27 : Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation (Salinité).

Restriction pour l'irrigation	CE en $\mu\text{S} / \text{cm}$	Pourcentage des échantillons
		Avril
Aucune	< 700	0 %
Légère à modéré	700 - 3000	80 %
Forte	> 3000	20 %

Tableau n°28 : Baisse de rendements de certaines cultures en relation avec la salinité de l'eau d'irrigation (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988)

		Conductivité (CE) en $\mu\text{S} / \text{cm}$			
Cultures	Orge	5300	6700	8700	12000
	Blé	4000	4900	6400	8700
Chute de rendement en %		0	10	25	50

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

III.4.2. Etude de la toxicité des végétaux

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

III.4.2.1. Sodium

L'emploi d'une eau d'irrigation riche en sodium se traduit généralement par une accumulation du sodium dans le sol. Les modifications qui peuvent apparaître dans le sol sont fonction des fréquences d'irrigations (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT 1988).

L'interprétation des analyses les directives du tableau n°29 permet de dire :

- ❖ 13 % des points d'eau ne présentent aucune restriction pour l'irrigation ;
- ❖ 53 % des points d'eau pendant le mois d'Avril 2016 présentent une restriction légère à modérée ;
- ❖ La restriction est forte avec 33 % des points d'eau.

**Tableau n°29 : Directives concernant la qualité de l'eau d'irrigation
(Toxicité spécifique de certains ions)**

		Sodium (még/l)	% des points d'eau
			Avril 2016
Restriction pour l'irrigation	Aucune	< 3	13.33 %
	Légère à modéré	3 - 9	53.34 %
	Forte	> 9	33.33 %

III.5. Analyse en Composantes Principales (A.C.P)

L'A.C.P est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des « individus » (forages, sources,...) sur lesquels sont mesurées des « variables quantitatives » (CE, teneurs en Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{--} et NO_3^-) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables (familles) ainsi que la répartition de ces dernières.

III.5.1. Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux de la plaine de M'Sila

L'analyse effectuée est une A.C.P centrée réduite qui a été réalisée sur un tableau de données à 08 variables (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^-) et à 15 échantillons prélevés au niveau de la campagne d'Avril 2016. L'interprétation de l'analyse se fera selon l'ordre des informations données par le logiciel (XLSTAT 2016). Les résultats de cette A.C.P sont présentés en annexe n°19.

III.6. Analyse statistique

D'après le tableau ci-dessous tableau n°30 , les ions Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{--} , HCO_3^- présentent un

$C_V < 0,5$, pour le reste des ions (Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^-) la dispersion est importante ($C_V > 0,5$).

Tableau n°30 : Paramètres statistiques des éléments chimiques des eaux souterraines

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Coeff de variation Cv Ecart-type
Ca	15	96,000	420,000	184,133	88,852	0,4825
Mg	15	77,000	189,000	110,467	33,897	0,3068
Na	15	45,000	370,000	165,467	86,069	0,5201
K	15	1,000	7,000	3,967	1,649	0,4157
Cl	15	59,000	377,000	170,467	83,142	0,4877
SO4	15	400,000	950,000	632,600	187,203	0,2959
NO3	15	4,000	56,000	22,533	14,638	0,6496
HCO3	15	144,000	547,000	355,733	111,635	0,3138

III.6.1. Matrice de corrélation

Le tableau n°31 présente les différentes corrélations entre les variables. Le coefficient de corrélation significatif d'après Mangin est $r = 0,518$ ($r^2 = 0,268$) pour 15 couples de données, ce qui permet de dégager les associations suivantes :

Le tableau n°31 :Présente les différentes corrélations entre les variables

$\text{Ca}^{++} - \text{Mg}^{++} : r = 0,882$	$\text{Ca}^{++} - \text{SO}_4^{-} : r = 0,826$	$\text{Ca}^{++} - \text{NO}_3^{-} : r = 0,635$
$\text{Mg}^{++} - \text{SO}_4^{-} : r = 0,861$	$\text{Mg}^{++} - \text{NO}_3^{-} : r = 0,801$	$\text{SO}_4^{-} - \text{NO}_3^{-} : r = 0,836$

Le tableau n°32 : Matrice de corrélation (Pearson (n))

Matrice de corrélation (Pearson (n))

Variables	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	NO3	HCO3
Ca	1							
Mg	0,882	1						
Na	-0,097	-0,055	1					
K	0,280	0,243	-0,938	1				
Cl	-0,105	-0,019	0,614	-0,571	1			
SO4	0,826	0,861	-0,107	0,250	-0,163	1		
NO3	0,635	0,801	0,133	0,078	0,087	0,836	1	
HCO3	-0,332	0,007	-0,225	0,120	0,282	-0,068	0,054	1

III.6.1.1. Etude des variables et des individus

Le traitement a été poussé jusqu'à 3 facteurs. A ce stade seulement 90 % de la variance ont été exprimés. Les résultats sont résumés dans le tableau n°33

Tableau n°33 : Pourcentage de variance exprimée

	F1	F2	F3
Valeur propre	3,567	2,364	1,268
Variabilité (%)	44,593	29,552	15,855
% cumulé	44,593	74,145	90,000

Les cercles ACP1 (Fig39) et ACP2 (Fig40) est déterminé par l'axe F1 et F2 et qui fournissent 90 % de renseignements. L'axe F1 (44,59%) montre une opposition entre les eaux fortement minéralisées et légèrement polluées par les nitrates, et les eaux faiblement minéralisées. L'axe F2 (29,55 %) est déterminé par les éléments Na⁺, K⁺ et Cl⁻.

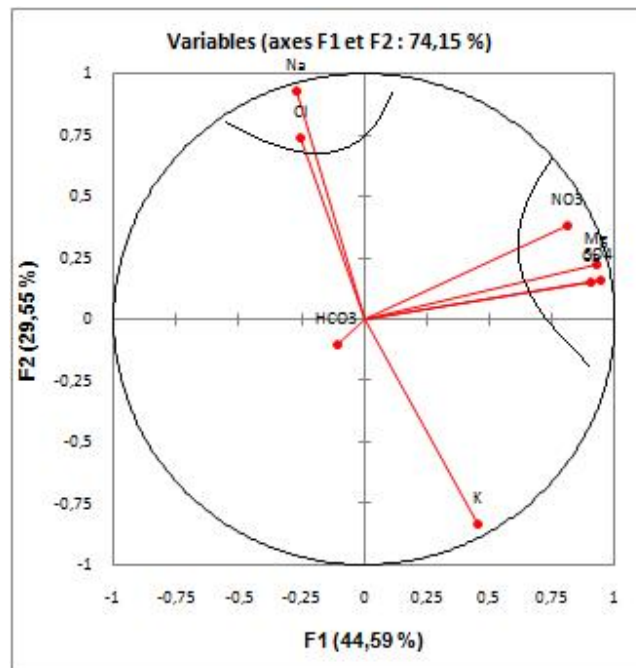


Fig. n°39: Plan des facteurs F1/F2

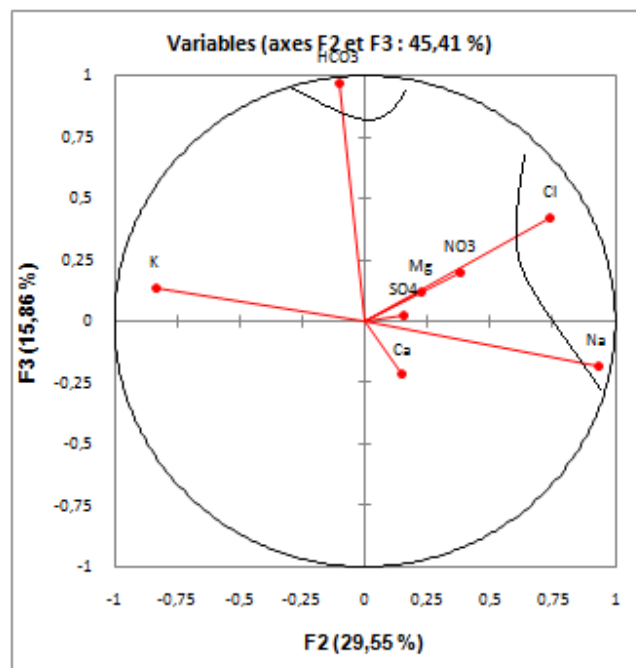


Fig. n°40: Plan des facteurs F1/F2

Les deux graphes ci-dessous (Fig41),(Fig42) mets en évidence la disposition des trois familles d'eaux: suivant l'axe F1, on trouve l'opposition entre les eaux minéralisées et légèrement polluées par les nitrates, et les eaux moins chargées. Suivant l'axe F2, on constate une opposition entre les eaux riches en Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{-2} et NO_3^{-} et les eaux moins minéralisées.

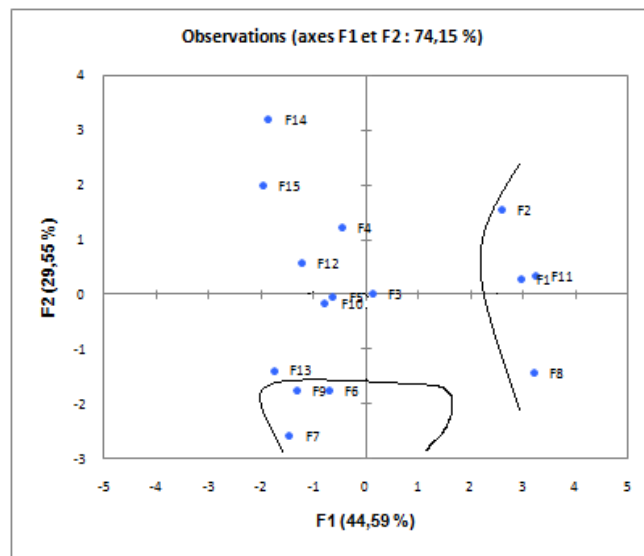


Fig. n°41: Plan des individus selon le plan F1/F2

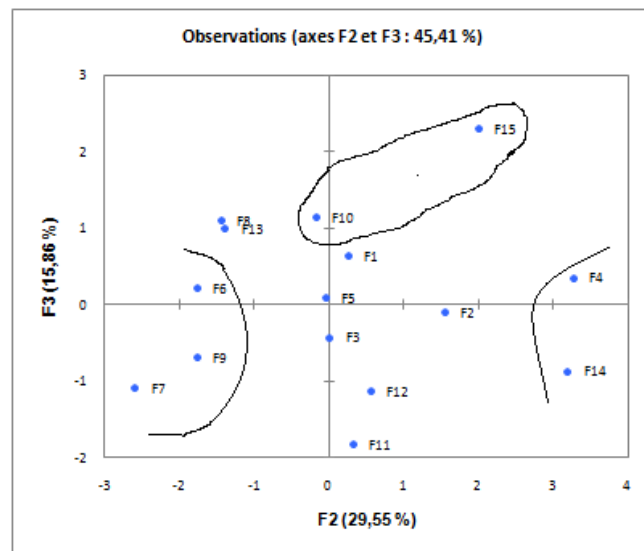


Fig. n°42: Plan des individus selon le plan F2/F3

