

SYNTHESE HYDROCHIMIQUE :

Dans cette partie nous résumerons la description des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines des aquifères des principales régions étudiées, en relevant les particularités des principales catégories d'eau identifiées et en établissant les traits comparatifs entre les différentes entités et masses d'eau.

2-1- Région autour du Djebel Murdjadjo :

Pour rappel, trois grandes nappes se caractérisent :

- ☐ La nappe côtière de la plaine de Bousfer-El-Ançor-Andalouses,
- ☐ La nappe karstique des calcaires miocènes (Djebel Murdjadjo SS),
- ☐ La nappe du flanc méridional du Djebel Murdjadjo.

-Dans la plaine de Bousfer-El-Ançor-Andalouses, les principaux faciès hydrochimiques rencontrés sont (figure 60) :

a- le faciès chloruré sodique : c'est le faciès le plus répandu, il occupe une grande étendue au niveau de la plaine de Bousfer-El-Ançor-Andalouses.

b - le faciès chloruré calcique et magnésien. Sur le diagramme, cinq échantillons ont été sélectionnés pour représenter les eaux de cette nappe (M05, M11, M46", M47. M76 et M77).

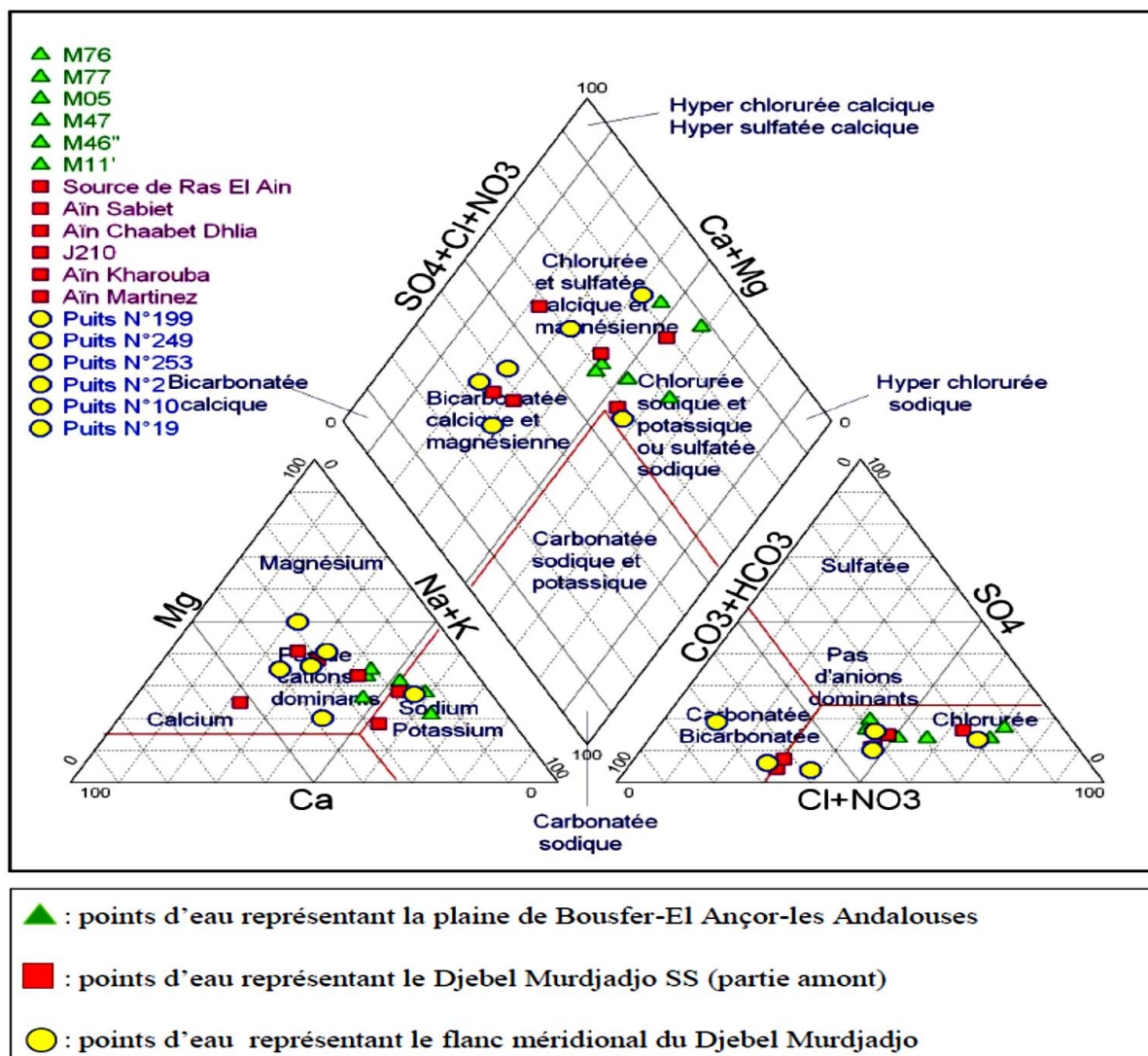


Figure 60: Représentation graphique par diagramme de Piper des analyses physico-chimiques des points d'eau caractéristiques du secteur du Djebel Murdjadjo.

Au niveau du Djebel Murdjadjo (partie amont) et de son flanc méridional

Sur le flanc sud du Djebel Murdjadjo, le faciès hydrochimique varie du faciès bicarbonaté calcique ou magnésien au faciès chloruré sodique en passant par les faciès de transition : bicarbonaté sodique, bicarbonaté potassique et parfois chloruré magnésien. La nature chimique des eaux est liée aux roches qu'elles traversent au cours de leurs écoulements souterrains.

Le faciès bicarbonaté calcique ou magnésien : caractérise les eaux des principales sources, puits et forages du Djebel Murdjadjo dans sa partie amont. Ce sont des eaux issues de des aquifères carbonatés du Secondaire (sources) ou du Miocène supérieur (sources, puits et forages) du Djebel Murdjadjo.

Les faciès de transition : bicarbonaté sodique, chloruré calcique et chloruré magnésien caractérisent les eaux de la partie amont du massif au contact des alluvions plio-quaternaire.

Le faciès chloruré sodique : caractérise la majorité des eaux de la plaine bordière.

Dans le Djebel Murdjadjo SS, aucune distinction de faciès n'est faite entre les eaux provenant des calcaires et des marno-calcaires à Tripolis sauf un léger supplément en sulfates pour cette dernière formation. De façon générale, dès la rupture de pente, les teneurs en bicarbonates diminuent progressivement pour laisser la place aux chlorures, avec des teneurs élevées en sulfates (figure 60). En direction de la zone de la grande Sebkha les eaux ont tendance à s'enrichir en chlorures, en sulfates et en sodium avec des minéralisations importantes (2000 mg/l, 3480 mg/l,...etc.).

La surexploitation (pompages intensifs) des eaux de la plaine de Bouyakour et Brédéah et la proximité de la zone de la Sebkha influe sur la forte minéralisation de ces eaux. La variabilité des teneurs en chlorures au niveau des trois secteurs étudiés est représentée en figure 54.

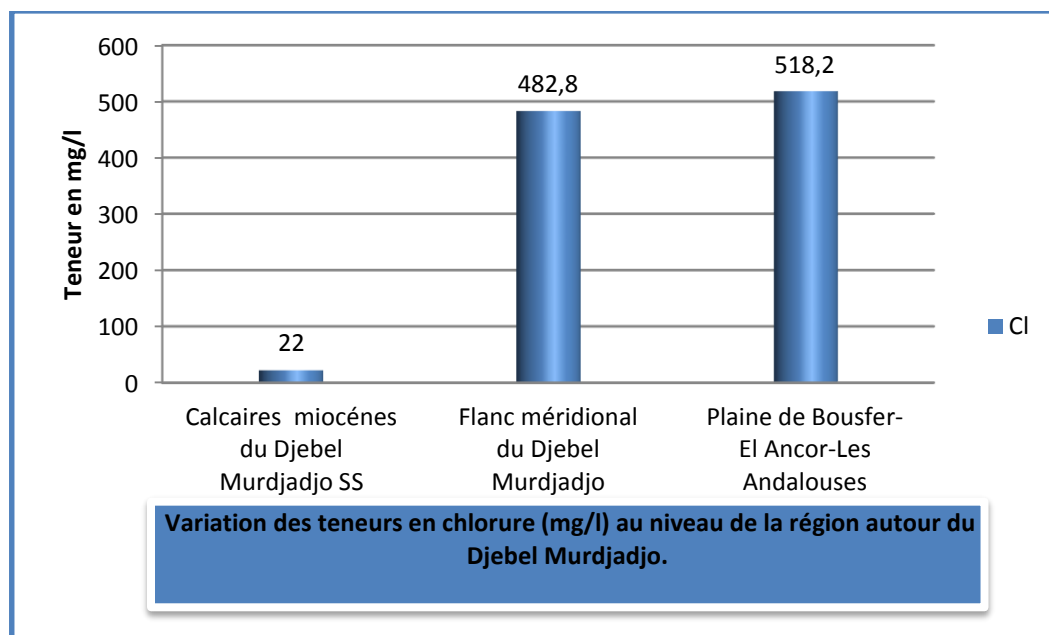


Figure 61 : Variation des teneurs en chlorure (mg/l) au niveau de la région autour du Djebel Murdjadjo.

La teneur en chlorure ramenées à l'ensemble des points d'eau étudiés est fortement élevée au niveau de la nappe de la plaine de Bousfer-El Ancor- Andalouses et de la plaine bordière. Elle reste faible au niveau du Djebel Murdjadjo SS (figure 61).

2-2 - Plaine de Ghriss :

L'ensemble des eaux des puits de la nappe superficielle de cette plaine présentent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien à chloruré sodique. La teneur en ions nitrates dépasse les normes de potabilité dans la majorité des puits.

Quant à l'eau de la nappe des calcaires du Jurassique, elle présente un faciès bicarbonaté calcique et magnésien à chloruré et sulfaté calcique et magnésien (Figure 62). Ceci s'explique par la circulation de l'eau dans les dolomies du versant nord des Monts de Saïda. Les eaux sont moins minéralisées que celles de la nappe superficielle.

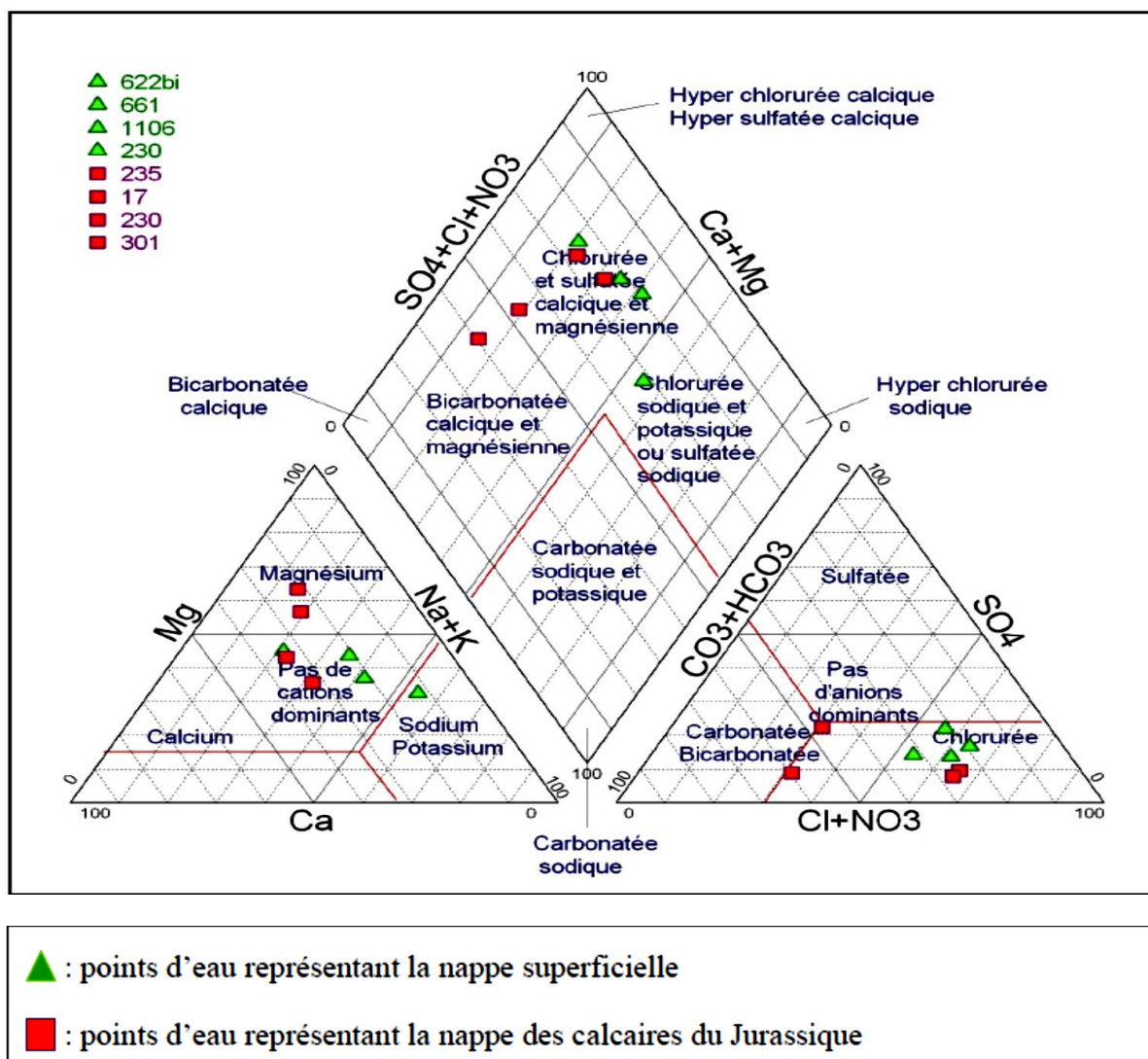


Figure 62 : Représentation graphique par diagramme de Piper des analyses physico-chimiques des eaux de la plaine de Ghriss.

2-3 - Monts de Tlemcen :

La nature hydrochimique des eaux des points d'eau pris en référence dans cette étude permet de distinguer deux faciès principaux :

* **un faciès bicarbonaté calcique** : représentant les eaux de la source Aîn Fouara et le forage TL7.

* **un faciès bicarbonaté magnésien** :

Représentant les eaux des sources d'Aîn Bendou et d'Aîn El Houtz (figure 63).

La minéralisation et conductivité des eaux du forage et de ces trois sources sont très liées linéairement. Les précipitations semblent avoir une influence certaine sur la distribution des fréquences de la conductivité et la variation du chimisme. Les variations des teneurs en cations et anions des sources et le forage des Monts de Tlemcen sont dues à la recharge de l'aquifère par la pluviométrie. En cours de saison sèche l'augmentation des concentrations est perceptible après quoi les teneurs diminuent car l'eau du réservoir se dilue avec l'eau des précipitations.

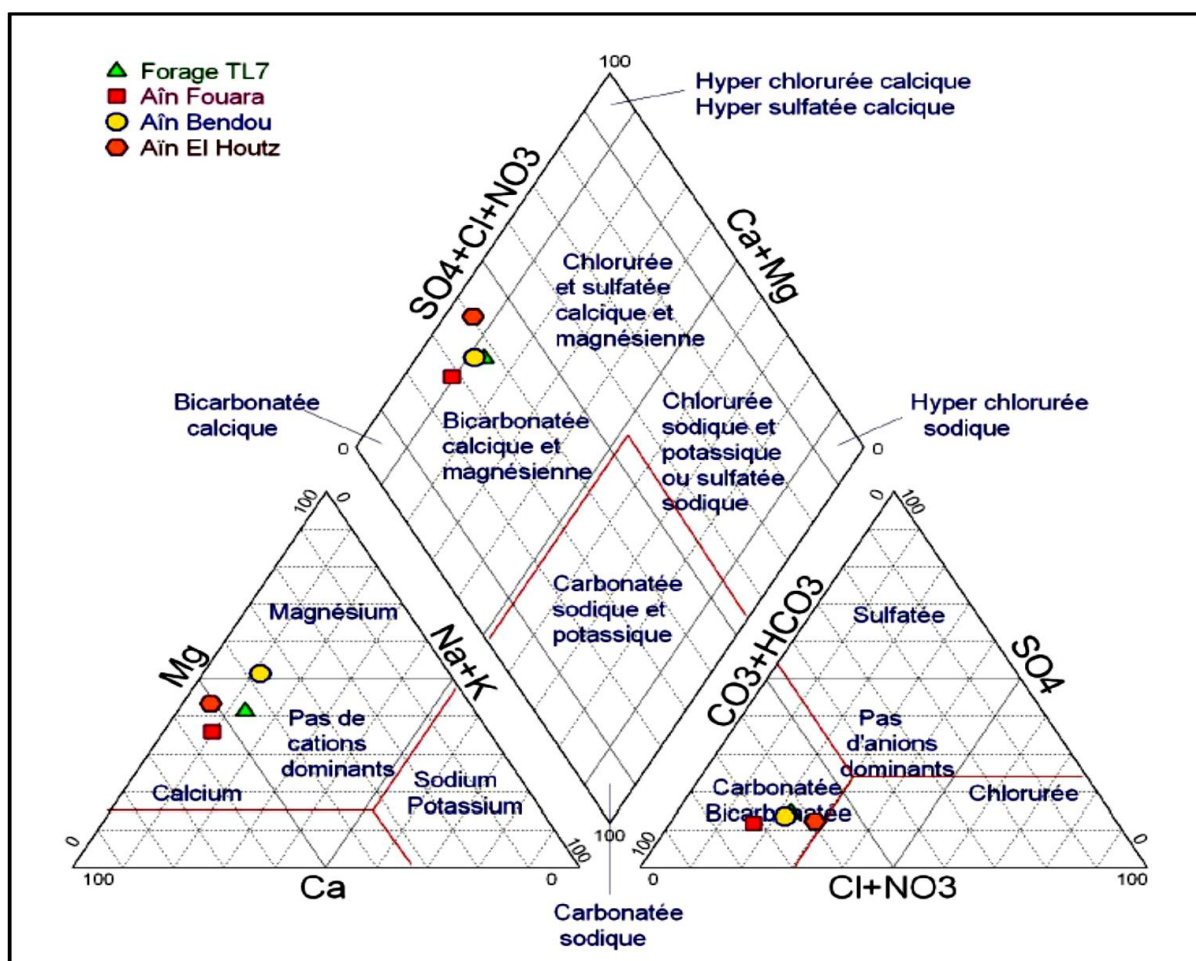


Figure 63 : Représentation graphique par diagramme de Piper des analyses physico-chimiques des trois sources et du forage TL7.

*** Etude conjointe des aquifères karstiques du Djebel Murdjadjo (SS) et des Monts de Tlemcen**

A titre comparatif, nous présentons en figure 64, un histogramme des teneurs en mg/l des différents échantillons représentatifs de points d'eau situés dans le Djebel Murdjadjo (Aïn Sidi Bou Ameer, Aïn Martinez et la Source de Ras El Aïn) et dans les Monts de Tlemcen (Aïn Bendou, Aïn El Houtz et le forage TL7).

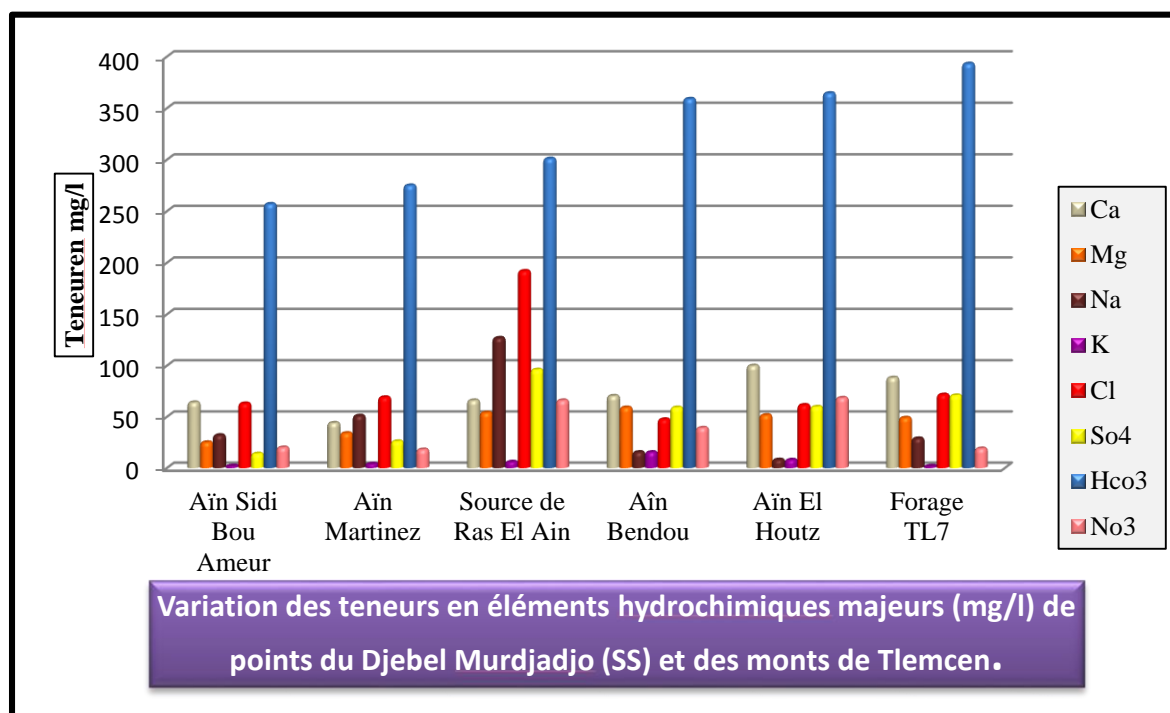


Figure 64 : Variation des teneurs en éléments hydrochimiques majeurs (mg/l) de points du Djebel Murdjadjo (SS) et des monts de Tlemcen.

Il apparaît que les teneurs en bicarbonates et en calcium soient plus prédominantes dans le cas des eaux provenant des Monts de Tlemcen (formations carbonatées du Jurassique) que dans le cas des eaux du Djebel Murdjadjo (formations carbonatées miocènes).

2-4 - Aquifères thermaux :

L'hydrochimie des eaux de l'ensemble des sources de Hammam Bou-Hadjar et de la source de Hammam Rabi, détermine nettement un faciès chloruré sodique. Dans le premier cas, la forte homogénéité du faciès hydrochimique confirme l'alimentation des sources de Hammam Bou-Hadjar à partir d'un aquifère profond situé dans l'unité allochtone Sénono-Oligocène tellienne, soit entre 600 et 800 m de profondeur.

L'interaction avec les aquifères superficiels semble faible. Pour rappel, l'aquifère profond de l'unité Sénono-Oligocène serait réchauffé par des apophyses volcaniques situées en profondeur sous la plaine expliquant par ailleurs les fortes teneurs en CO_2 , émanant d'une chambre magmatique profonde, rencontrées dans les eaux de ces sources (Dalloni, 1928, CRAAG, 2005).

Concernant les eaux des sources de Hammam Rabi, le faciès chloruré sodique est moins accentué, la source étant alimentée par l'aquifère dolomitique du Hettangien-Pliensbackien. Pour rappel, les eaux chaudes de cet aquifère profond remontent par l'intermédiaire d'une faille à travers le Jurassique moyen et sourdent dans les alluvions Tertiaires et Quaternaires (G. Pitaud, 1973).

2-5 - Etude synthétique

Nous présentons en (figure 65) une vue globale de la disposition sur diagramme de Piper de différents points d'eau représentatifs des différents aquifères étudiés.

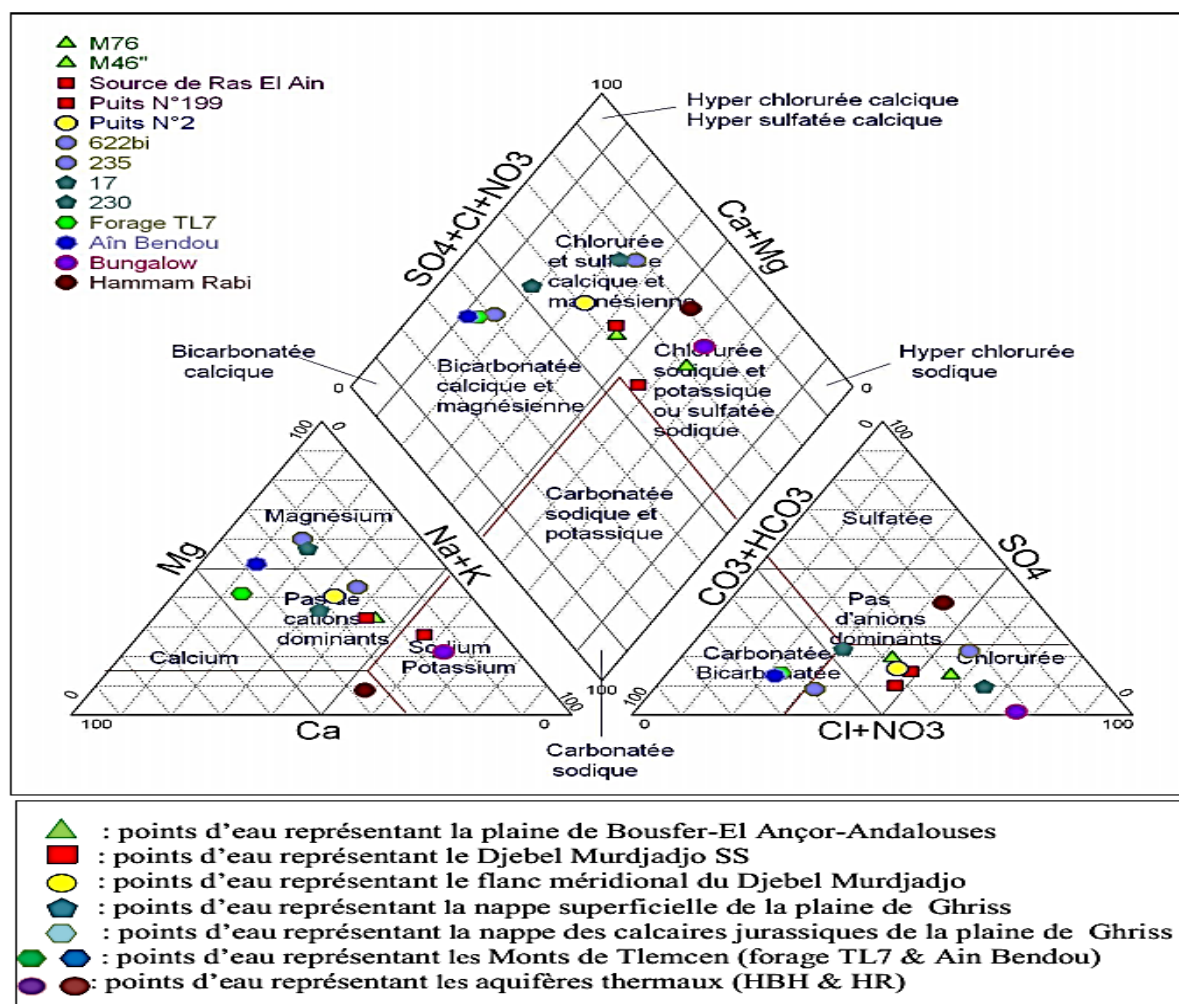
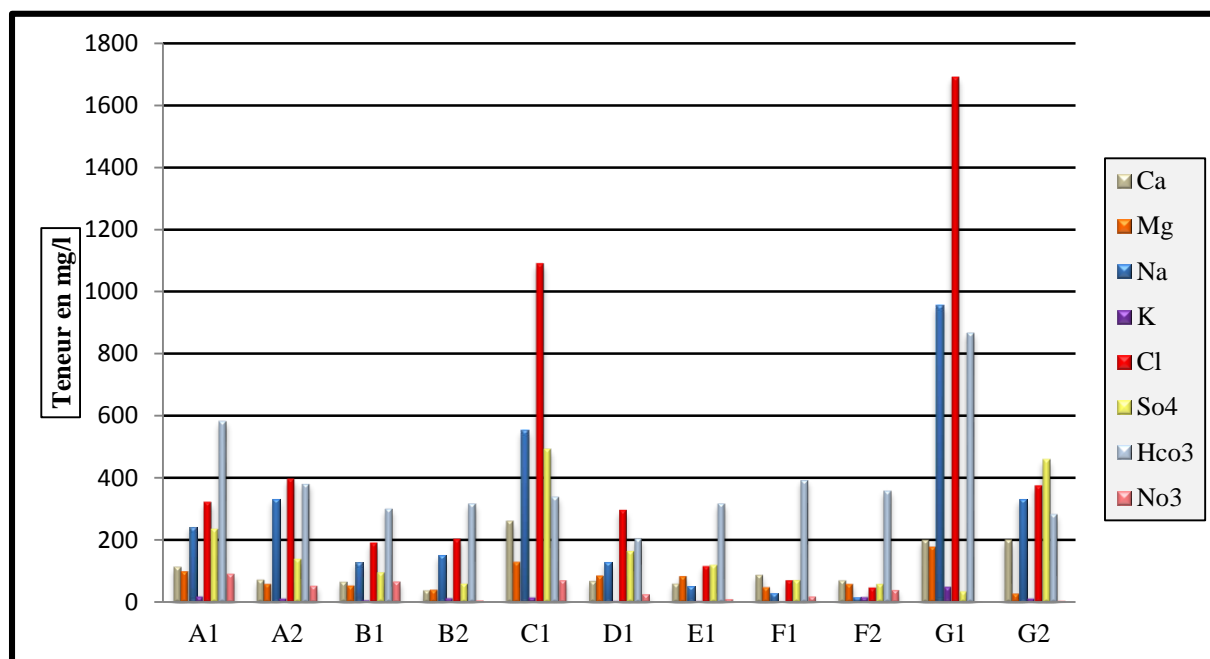


Figure 65 : Représentation graphique par diagramme de Piper des analyses physico-chimiques des eaux des différentes nappes étudiées.

Les points d'eau se répartissent sur l'ensemble des faciès hydrochimique du diagramme sauf sur le faciès carbonaté sodique et potassique

Par ailleurs, les résultats de l'analyse des teneurs en mg/l des différents éléments chimiques des points d'eau représentatifs sont présentés dans l'histogramme de la figure 66. Ce schéma visualise la prédominance respective entre éléments chimiques de chaque point analysé et montre en particulier la forte teneur en chlorure et du sodium des eaux de la source de Hammam Bou-Hadjar.



Légende :

* A1, A2 : Plaine de Bousfer-El Ançor-Andalous.

* B1, B2 : Djebel Murdjadjo SS.

* C1 : Flanc méridional du Djebel Murdjadjo.

* D1 : Nappe superficielle de la plaine de Ghriss.

* E1: Nappe des calcaires du Jurassique de la plaine de Ghriss.

* F1 : Forage TL7 (Monts de Tlemcen).

* F2 : Aïn Bendou (Monts de Tlemcen).

* G1 : Hammam Bou-Hadjar (Aquifères thermaux).

* G2 : Hammam Rabi (Aquifères thermaux).

Figure 66 : Variation des teneurs en éléments hydrochimique majeurs (mg/l) des points d'eau des différentes nappes étudiés.

6 - Etude statistique en composante principale :

Nous appliquons également une étude statistique de la distribution des principaux paramètres chimiques par analyse en composante principale sur 20 échantillons représentatifs des différents contextes hydrogéologiques et hydrochimique étudiés. Ces échantillons sont recensés au Tableau n°30. Nous avons pris en considération les éléments majeurs suivants : Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , NO_3^{-} , ainsi que le résidu sec et le PH.

Tableau n° 30 : Les échantillons représentatifs des différents points d'eau.

Région d'étude		Echantillons représentatifs
Région autour du Djebel Murdjadjo	Plaine de Bousfer-El Ançor-Andalous	M 70
		M 05
		M46"
	Djebel Murdjadjo SS	Source de Ras El Aïn
		Aïn Chaabet Dhia
		Aïn Kharouba
		Aïn Martinez
	Flanc méridional du Djebel Murdjadjo	Puits N°253
		Puits N°199
		Puits N°02
Plaine de Ghiss		Puits N°10
	Nappe superficielle	622bi
		1106
		235
	Nappe des calcaires du Jurassique	17
Aquifères thermaux		230
	Monts de Tlemcen	Forage TL7
		Aïn Bendou
	Hammam Bou-Hadjar	Source de Bungalow
	Hammam Rabi	Source de Hammam Rabi

a)- statistiques élémentaires :

Dans le tableau n° 31, nous avons présenté le calcul des moyennes et des écarts -types de la série de différents éléments chimiques.

Tableau n° 31: Calcul des moyennes et des écarts -types de la série.

Variables	Moyennes (mg/l)	Ecart-types de la série
Ca ⁺²	96,579	61,460
Mg ⁺²	67,900	37,257
Na ⁺	184,713	206,487
K ⁺	9,363	10,065
Cl ⁻	324,157	376,135
SO ₄ ⁻	111,695	100,561
HCO ₃ ⁻	362,805	155,384
NO ₃ ⁻	29,010	22,857
RS	1180,763	825,072
PH	41,318	150,331

b)- Matrice de corrélation :

Dans le tableau n° 32, nous avons figuré les valeurs des coefficients de corrélation entre les teneurs des différents éléments majeurs :

Tableau n° 32 : Matrice de corrélation des éléments chimiques.

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	RS	PH
Ca ⁺²	1									
Mg ⁺²	0,53	1								
Na	0,62	0,65	1							
K ⁺	0,50	0,75	0,86	1						
Cl ⁻	0,73	0,79	0,94	0,84	1					
SO ₄ ⁻	0,54	-0,02	0,18	0,05	0,11	1				
HCO ₃ ⁻	0,47	0,76	0,70	0,82	0,73	-0,06	1			
NO ₃ ⁻	-0,02	0,16	-0,13	0,01	-0,13	0,13	0,17	1		
RS	0,81	0,72	0,91	0,81	0,93	0,37	0,65	-0,03	1	
PH	-0,18	0,03	-0,17	-0,17	-0,14	-0,15	0,03	0,10	-0,33	1

On remarque que la majorité des éléments majeurs sont corrélés positivement entre eux. Les meilleures corrélations positives se retrouvent entre : les chlorures et le sodium (0,94) ou le potassium (0,84). Le potassium est également bien corrélé avec le sodium (0,86).

On note également de bonnes corrélations du résidu sec avec les ions Na^+ (0,91) et Cl^- (0,93) dont dépend en grande partie la minéralisation.

*** Etude par analyse en composant principale (ACP)**

L'analyse en composant principale est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive, utilisable comme aide à l'interprétation d'une matrice de données. Les matrices de données physico-chimiques comportent "m" analyses (ou points échantillonnés) sur "n" variables (ou éléments mesurés). Cette méthode, en cherchant les directions référentielles d'allongement d'un nuage de point multidimensionnelle (valeurs propres), permet de résumer l'information en projetant le nuage de point sur ses directions préférentielles (Axes factoriels).

Les facteurs sont des combinaisons linéaires des variables de départ. Chaque variable contribuant au facteur intervient avec un coefficient dit "vecteur propre". Le premier axe factoriel est celui qui explique le plus grand pourcentage de variance totale, le second explique le plus grand pourcentage de variance résiduelle. Pour être significatif, le cumul de l'inertie des axes doit être supérieur à 65%.

1-Résultats obtenus pour les nappes étudiés :

a)- Diagonalisation : F1, F2 : Valeurs propres (variances sur les axes principaux).

Tableau n° 33 : Vecteurs propres (coefficient des variables centrées réduites dans l'équation linéaire des axes principaux).

variables	F1	F2
Ca^{+2}	0,326	0,342
Mg^{+2}	0,351	-0,279
Na^+	0,394	0,007
K^+	0,383	-0,160
Cl^-	0,410	-0,036
SO_4^-	0,100	0,634
HCO_3^-	0,344	-0,336
NO_3	0,000	-0,153
R.S	0,408	0,183
PH	-0,083	-0,455

Variance : - F 1 : 55,69 %

- F 2 : 15,06 %

b) - Etude des variables :

-Colonnes F1, F2 : Corrélations entre les variables et les facteurs.

- Colonnes F1', F2' : cosinus carrés des variables.

Tableau n° 34 : étude des variables.

variables	F1	F1'	F2	F2'
Ca ⁺²	0,768	0,591	0,420	0,176
Mg ⁺²	0,827	0,685	-0,343	0,117
Na ⁺	0,929	0,864	0,008	0,000
K ⁺	0,903	0,816	-0,197	0,039
Cl ⁻	0,967	0,935	-0,044	0,002
SO ₄ ⁻	0,235	0,055	0,777	0,604
HCO ₃ ⁻	0,813	0,660	-0,412	0,170
NO ₃	-0,001	0,000	-0,188	0,035
R.S	0,962	0,925	0,225	0,051
PH	-0,195	0,038	-0,558	0,312

Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand.

Dans l'axe F1, tous les éléments sont corrélés positivement sauf le PH et NO₃ (figure 67). Les éléments SO₄ et NO₃ sont le plus proches de l'origine de l'axe ce qui indique leur moindre corrélation avec les autres éléments.

Na, Cl et K sont bien corrélés positivement selon l'axe F1. La corrélation du Na - K est bien meilleure que la corrélation Ca - Mg.

Selon l'axe F2, on constate que les paramètres : Cl, K, Mg, HCO₃ et NO₃ sont nettement corrélés négativement à : Na, Ca et SO₄.

c)- Etudes des individus :

Colonne F1, F2,... : coordonnées des individus sur les axes principaux.

Colonnes F1', F2',... : cosinus carrés (qualité de présentation).

Tableau n° 35 : étude des individus.

Echantillon	variables	F1	F1'	F2	F2'
plaine de B-A-Andalouses	Obs1	1,780	0,232	-0,161	0,002
plaine de B-A-Andalouses	Obs2	-0,622	0,129	0,717	0,172
plaine de B-A-Andalouses	Obs3	0,441	0,087	0,037	0,001
Djebel Murdjadjo SS	Obs4	-0,999	0,255	-0,193	0,010
Djebel Murdjadjo SS	Obs5	-1,073	0,587	0,059	0,002
Djebel Murdjadjo SS	Obs6	-1,223	0,457	-0,674	0,139
Djebel Murdjadjo SS	Obs7	-1,996	0,791	-0,273	0,015
flanc méridional du D- Murdjadjo	Obs8	-2,011	0,671	-0,096	0,002
flanc méridional du D- Murdjadjo	Obs9	-1,015	0,297	-0,210	0,013
flanc méridional du D- Murdjadjo	Obs10	-0,773	0,406	-0,130	0,011
flanc méridional du D- Murdjadjo	Obs11	1,610	0,329	1,608	0,328
Nappe superficielle	Obs12	-0,566	0,139	0,620	0,166
Nappe superficielle	Obs13	-1,064	0,403	0,111	0,004
Nappe superficielle	Obs14	-1,990	0,165	-2,991	0,373
Nappe des calcaires du jurassique	Obs15	-1,074	0,399	0,042	0,001
Nappe des calcaires du jurassique	Obs16	3,232	0,749	0,130	0,001
Forage TL7	Obs17	-1,227	0,582	0,009	0,000
Aïn Bendou	Obs18	-0,976	0,316	-0,593	0,117
Hamam Bou-Hadjar	Obs19	8,427	0,920	-1,714	0,038
Hamam Rabi	Obs20	1,119	0,065	3,701	0,707

Les valeurs en gras correspondent pour chaque variable au facteur pour lequel le cosinus carré est le plus grand

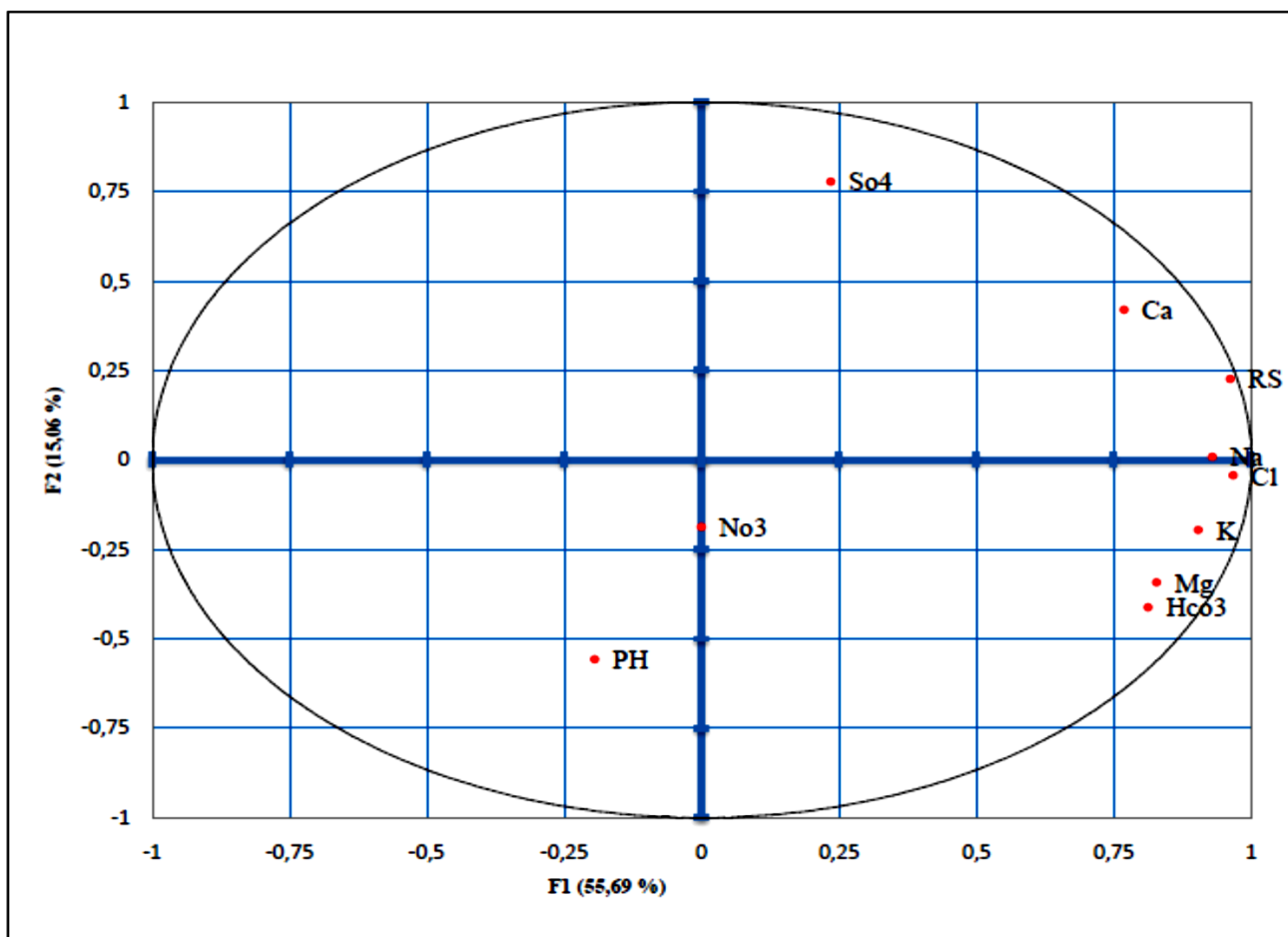


Figure 67 : Cercle de corrélation : axes F1 et F2, étude des variables

L'étude de la répartition des individus, parallèlement à celle des variables, fait apparaître quelques regroupements de points (figure 68).

Groupe 1 : (eau thermale de Hammam Bou Hadjar) : individu à position fort décentrée par rapport aux autres individus et sur le prolongement du pôle Na-Cl. Cette position s'explique par la forte minéralisation de cet individu (RS = 3680 mg/l).

Groupe 2 : (nappe des calcaires du jurassique de la plaine de Ghriss) : eaux à faciès chloruré à bicarbonaté calcique et magnésien et à forte minéralisation (RS = 2240).

Groupe 3 : (nappe côtière B-A-Andalouses et les nappes du flanc méridional du Djebel Murdjadjo et la source de Hammam Rabi) : eaux de faciès chloruré et à cations variables (K, Na et Ca) et minéralisation moyenne (520 < RS < 2040).

Groupe 4 : les calcaires miocènes du Djebel Murdjadjo SS et le forage TL7 et la source de Aïn Bendou) : les moins minéralisées (600 < RS < 900).

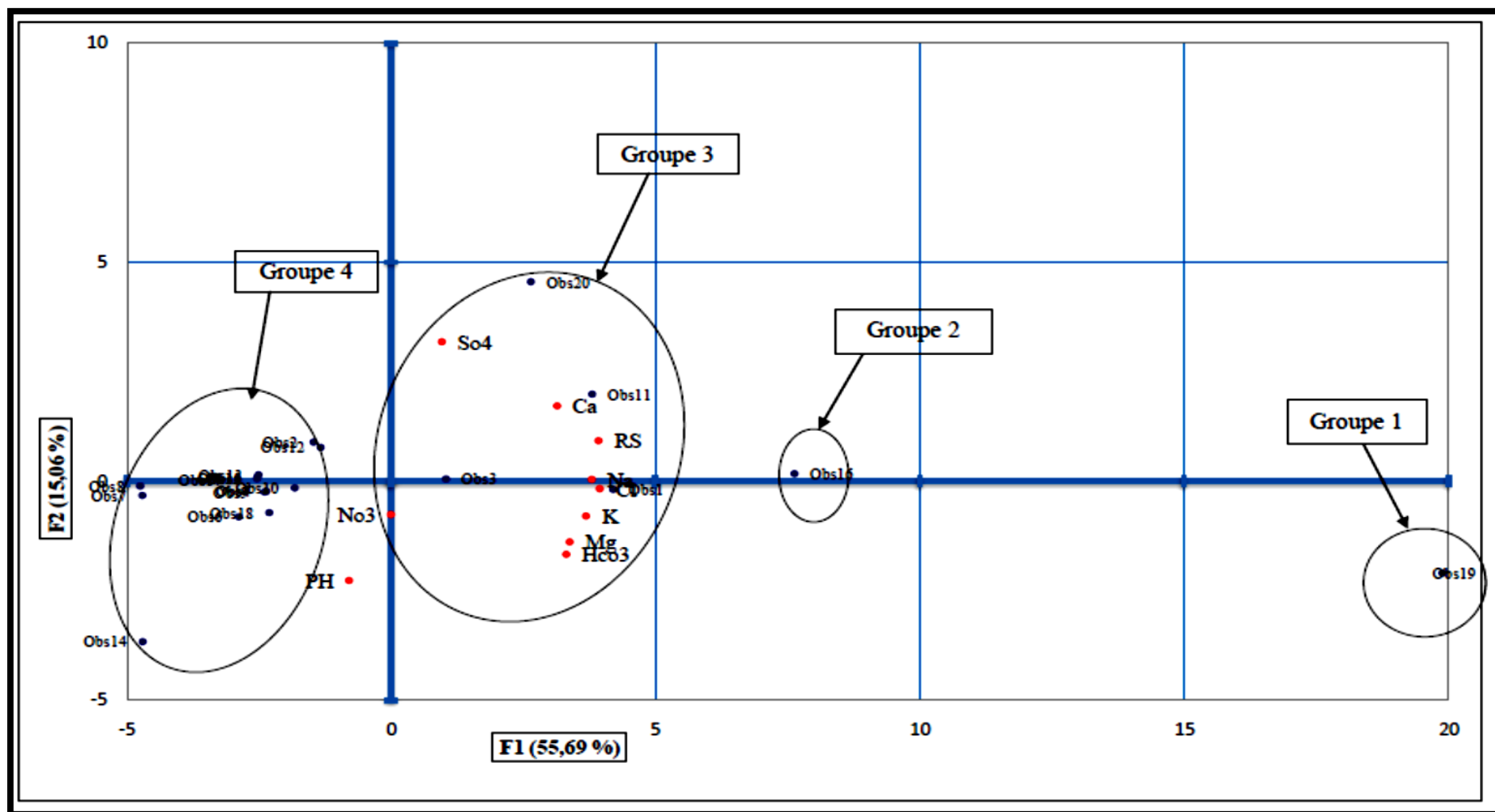


Figure 68 : Cercle de corrélation : Axes F1 et F2 :70,75% (variable et individus)

7- CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHISEE DES DIFFERENTS AQUIFERES ETUDIES (fig. 69).

Au vu de ces différentes analyses, la classification ascendante hiérarchisée des données physico-chimiques présentant une meilleure corrélation entre eux. La classification ascendante hiérarchisée réalisée montre quatre grandes familles (tab.36), On distingue :

Classe 01 : cette famille regroupe les eaux de la nappe karstique des calcaires miocènes du djebel Murdjadjo et les eaux des monts de Tlemcen (forage TL7 et la source de Ain Bendou) et les eaux de la nappe superficielle de la plaine de Ghriss , ces eaux sont les moins minéralisées caractérisée par ses teneurs faibles en ions majeurs.

Classe 02 : cette famille regroupe les eaux de la nappe des calcaire du jurassique de la plaine de Ghriss et un peut les eaux des nappes côtière, ces sont minéralisées à cause des teneurs élevées en Cl et HCO₃ ; et Na. Due à la dissolution des formations carbonatées.

Classe 03 : cette famille regroupe les eaux de flanc sud du djebel Murdjadjo et eau thermale de Hammam Rabi, ces eaux sont plus minéralisées à cause de sa teneur en Cl et Na, Ca et HCO₃, ça se peut la dissolution des évaporites ou/ la dissolution des formations carbonatées.

Classe 04 : cette famille regroupe les eaux thermale de Hammam Bou Hadjar qui sont un peu moins minéralisées que la classe 03.

Classe 01	Classe 02	Classe 03	Classe 04
pl.bousef	pl.bousef	Fl.murd	h.bouhj
pl.bousef	griss.Nc	h.rabi	
D.mu.ss			
D.mu.ss			
D.mu.ss			
D.mu.ss			
Fl.murd			
Fl.murd			
Fl.murd			
griss.N.s			
griss.N.s			
griss.N.s			
griss.N.c			
m.telmcen			
m.telmcen			

Tableau n 36 : Nombre de classe des différents aquifères étudiés..

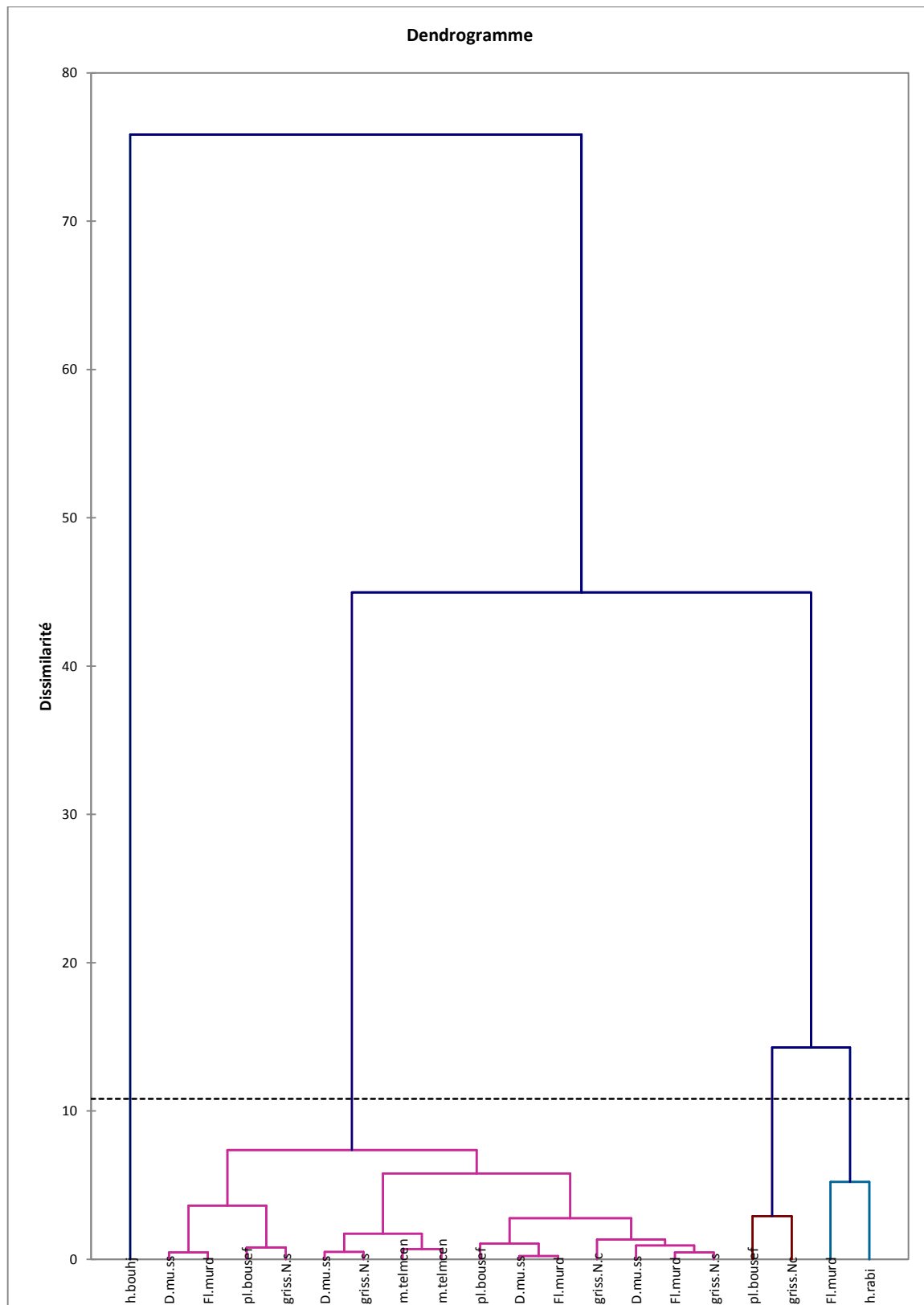


Figure 69 : Classification Ascendante Hiérarchisée des différents aquifères étudiés.

