Application des concepts d'analyse multivariée pour l'évaluation de l'hydrochimie des eaux albiennes «Partie occidentale du bassin du S.A.S.S : (Touat, Gourara et Tidikelt)»

BENHAMIDA Slimane.A [(1)], NEZLI Imed Eddine [(2)], KECHICHED Rabbahc [(3)],

[(1)] *Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) – Direction Régionale Sud-Ouargla, 30000, Algérie.*
E-mail : *slimbenha@gmail.com*
[(2)] *Laboratoire du géologie de Sahara, Université de Ouargla, 30000, Algérie.*
E-mail : *imedinezli@yahoo.fr*
[(3)] *Laboratoire des Réservoirs Souterrains: Pétroliers, Gaziers et Aquifères, Université de Ouargla, Algérie.*
kechiched.ra@univ-ouargla.dz

Résumé.

Parmi les approches qui étudient et identifient les phénomènes responsables de l'origine de la chimie des eaux souterraines, on trouve la méthode géostatistique, où le traitement et l'interprétation des données sont effectués de manière simplifiée et dans un espace très restreint (Lagarde, 1995 dans Ahoussi et al, 2010).

La méthodologie optée pour la présente étude, traitera l'origine de la minéralisation des eaux albiennes dans la partie occidentale du bassin SASS. Cette dernière est basée sur la combinaison entre l'A.C.P et l'C.H.A, autrement dit entre l'Analyse en Composantes Principales et la Classification Hiérarchique Ascendante.

Dans le cas présent, l'A.C.P permet de mettre en évidence la répartition spatiale des différents éléments chimiques lors de leur évolution ainsi que la ressemblance et la relation que peut présentait une ou plusieurs variables. Cette méthode, permet donc de réunir puis de classer un nombre important de données pour en déduire les principaux facteurs qui sont à l'origine de cette évolution et définir en suite les relations qui les réunissent. Quant au principe de l'C.A.H, c'est de rassembler les individus (dans notre cas les paramètres physico-chimiques), et ce selon un critère de ressemblance défini au préalable qui s'exprimera sous la forme d'une matrice, qui va ensuite rassembler ces individus de manière répétée afin de produire un dendrogramme ou arbre d'arrangement ou de classification.

***Mots Clefs* :** Analyses statistiques, ACP – CHA Continental Intercalaire, Bassin occidental S.A.S.S, Hydrochimie.

1. *Introduction.*

En vue d'étudier l'évolution géochimique spatiale ainsi que le comportement physico-chimique des eaux albiennes dans la partie occidentale du domaine SASS, dans le but d'identifier l'origine du chimisme de ces eaux qui règne sur l'axe reliant la zone du Gourara à celle du Tidikelt en passant par le Touat, il a été jugé utile de mener une étude géostatistiques et hydro-chimique des eaux de cette nappe en se basant sur des mesures physico-chimiques d'échantillons d'eau prélevés à partir des forages d'eau en services visitées lors d'une campagne effectuée en 2012 par les techniciens de l'ANRH d'Adrar.

Il est à signaler que les différents inventaires effectués par les services techniques de l'ANRH depuis les années 70 ont enregistrés une évolution croissante et alarmante du nombre de forages réalisés vue les besoins en eau, que ce soit pour le secteur agricole, domestique ou énergétiques. Avant 2000 on a recensé plus de 400 points d'eau, actuellement on frôlait les 1000 forages sans compter les puits de foggaras, dont la plupart sont actuellement en services. Cette prolifération sans cesse, avec un climat aride et sec qui caractérise cette zone avec une recharge très insignifiante de la nappe aquifère, tous ces paramètres associés ont engendrées des effets néfastes sur l'état qualitatif de la ressource en eau et en sol de cette zone.

La méthodologie appliquée dans cette étude est basée sur la détermination de la classification hydrogéochimique des eaux souterraines à partir des 470 échantillons d'eau prélevés ensuite analysés au laboratoire de l'ANRH à Adrar, par la suite elles ont été synthétisées à l'aide du

diagramme de Piper avec l'utilisation des méthodes statistiques multi variées notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA), pour une compréhension précise de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans la partie occidentale de la zone du SASS.

2. Cadre physique de la zone d'étude.

Installée en plein cœur du Sahara algérien, la région d'étude est située au sud-ouest du pays à plus de 1200 km d'Alger (fig. n°01).

Géographiquement elle se situe entre les méridiens : 3°14'E et 1° 22' W, et les parallèles: 26° 28'et 30° 19' Nord. Caractérisée par une superficie totale de plus de 190000 Km^2, elle est découpée en 03 régions bien distinctes qui chevauchent entre deux wilayas, Adrar et Tamanrasset.

Ces trois régions constituées d'un ruban d'oasis sous forme de croissant, qui peuvent être citées du Nord au Sud comme suit :

- Le Gourara qui correspond à Timimoune et ses environs (W – d'Adrar).
- Le Touat (région d'Adrar et les pourtours).
- Le Tidikelt qui correspond à In Salah et ses environs (W – Tamanrasset).

3. Géologie et hydrogéologie.

Comme l'indique la carte ci-contre (fig. n° 02), la région d'étude fait partie de la zone qui se situe sur le rebord Sud occidental du vaste bassin secondaire qui s'étend d'une part de l'Atlas Saharien au Nord à Hamada du Tinhert au Sud, et du Touat – Gourara à l'Ouest jusqu'au golf de Gabes à l'Est, d'autre part.

En tenant compte des coupes géologiques corrélatives établies, la stratigraphie de la région se distingue du plus récent (Quaternaire) au plus ancien (Paléozoïque) par huit grandes unités géologiques réorganisées selon l'échelle suivante :

1- Quaternaire	4- Cénomanien
2- Continental terminal	5- Conti. Intercalaire
3- Turonien	6- Jurassique
7- Trias	8- Paléozoïque

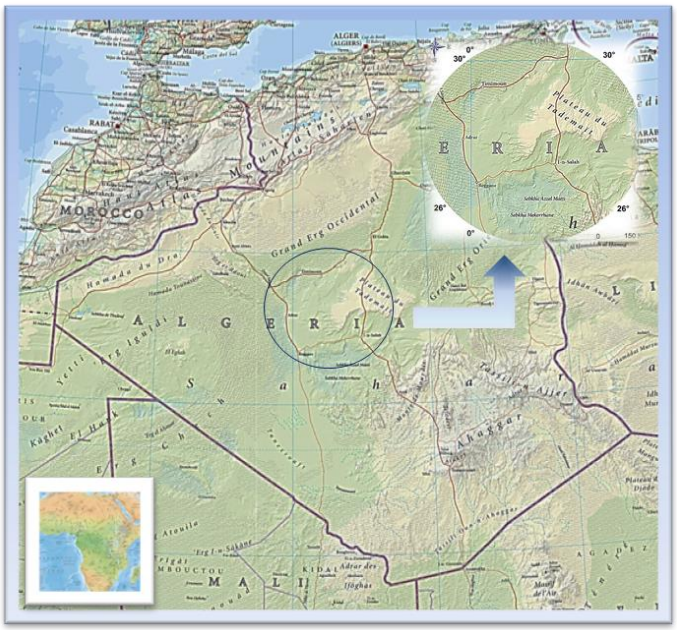


Fig.1. Localisation de la zone d'étude par rapport au sahara Algérien.

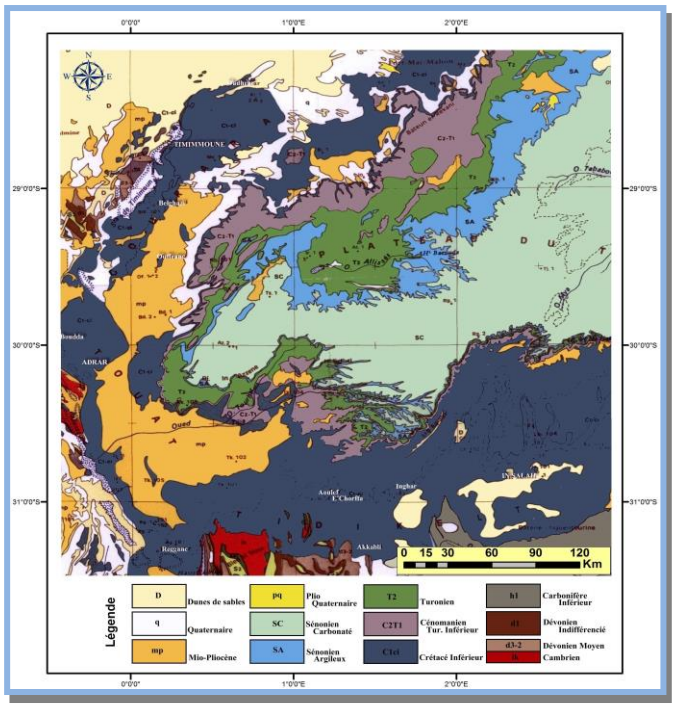


Fig.2. Extrait de la carte Géologique du Bassin Mésozoïque du Sahara Algéro-Tunisien (D'après BUSSON au 1/500.000)

Du point de vue hydrogéologie, le système aquifère qui caractérise la zone d'étude est représenté par une seule nappe (de type libre) nommée souvent Albienne ou C.I (Continental Intercalaire), cette dernière contenue dans les formations gréseuses d'âge Crétacé inférieur qui s'étend le long du grand Erg oriental jusqu'au Lybie en passant par la Tunisie, est composée principalement de sables, de grès verts parfois argileux et de graviers parfois à ciment calcaire, la profondeur des forages qui captent cette nappe oscille entre 100 et 200m en moyenne, le niveau statique de cette nappe varie du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest, entre 0,8m et plus de 50 m, avec des débits d'exploitation qui oscille de 5 à 50 l/s.

Il est à signaler que du point de vue hydrodynamisme cette zone, joue un double rôle puisqu'elle correspond à la fois à l'exutoire naturel de la nappe du CI et à aussi à la zone de recharge. Il est à remarquer également qu'il y a 25 ans cette nappe était artésienne jaillissante le long de toute l'aire de la zone d'étude.

Les coupes hydrogéologiques corrélatives établies par l'OSS.2005 (figs. n°4 et n°5), illustrent une succession stratigraphique continue allant du Paléozoïque au Mésozoïque apparait où les formations du Continental Terminal affleurent tout au long de la partie orientale du bassin au pied mont du Plateau du Tademaït.

A l'extrême Ouest du bassin ainsi qu'au Sud-Est, les formations primaires notamment le Dévonien inférieur se mettent en contact avec les formations du Continental Intercalaires et du Jurassique, et ce suite à des mouvements tectoniques qui ont affectés la région durant la phase hercynienne, et ayant engendrés la disparition du Cénomanien pour mettre en contact direct les deux formations du Continental Intercalaires avec celle du Complexe Terminal.

4. Matériel et méthodes d'étude.

La base de données avec laquelle le présent travail a été élaboré, a été perçue de la Direction Régionale Sud-Ouest de l'ANRH d'Adrar. Elle englobe 472 échantillons d'eau prélevés des 551 forages visités tous en 2012.

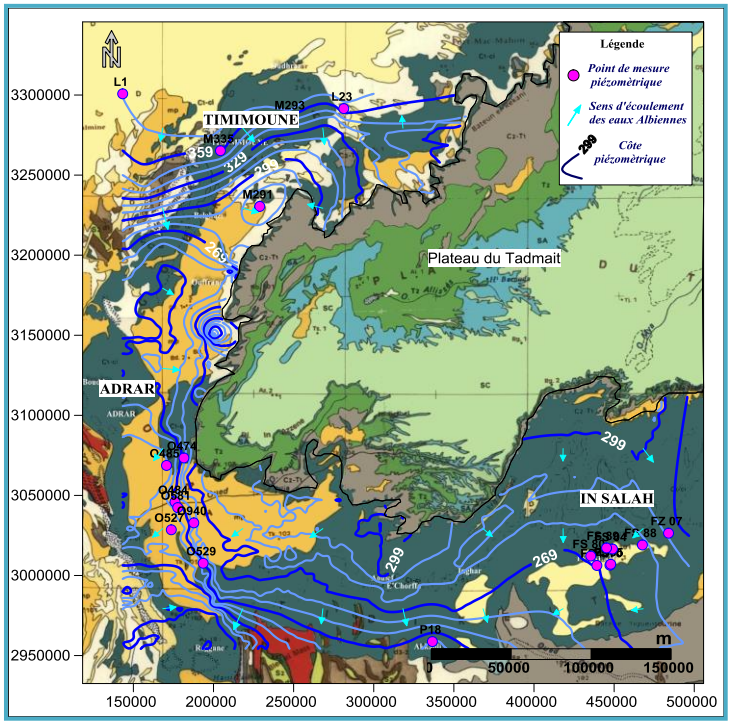
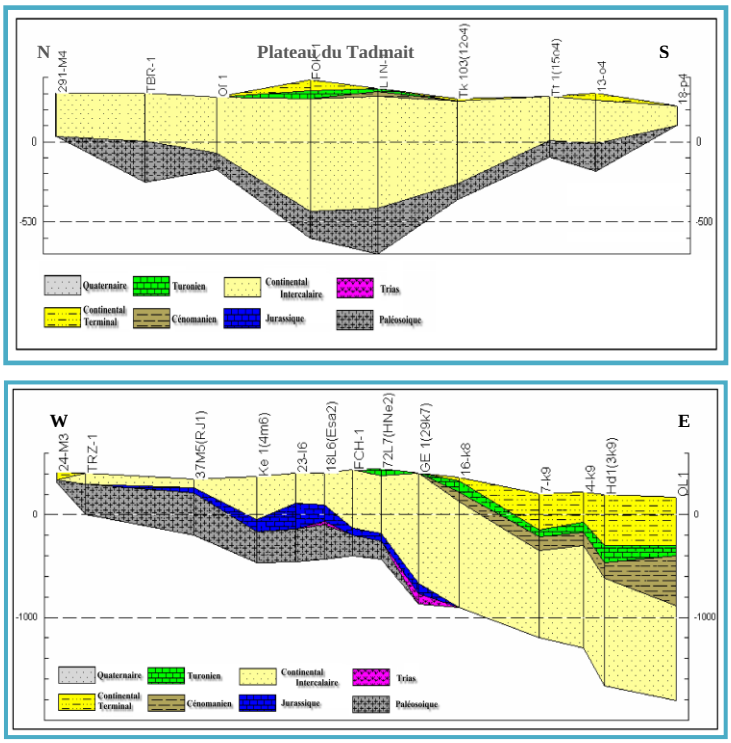


Fig.3. Carte Piézométrique de la nappe du C.I dans le Touat – Gourara – Tidikelt (Année 2012)



Figs.4 & 5. Coupes hydrogéologiques de synthèses (D'après l'OSS – SASS 2005)

Ces 472 échantillons ont été ensuite transférés pour être analysés au niveau du laboratoire de cette même Direction Régionale, des mesures in-situes ont été également effectuées sur terrain notamment le pH et la Conductivité.

Ces analyses exprimées en (mg/l) ont concernées en plus de la TDS (Résidu Sec) et l'Alcalinité, la concentration des Nitrates, des Sulfates, des Phosphates, du Fluor, du Calcium, du Magnésium, du Sodium, du Potassium, des Chlorures, des Bicarbonates et du Silicium présents dans l'eau.

Les méthodes ayant été utilisées pour la détermination des concentrations des différents éléments chimiques dissouts dans l'eau tel que la teneur en Sodium (Na^+), en Potassium (K^+), en Calcium (Ca^{2+}) et en Magnésium (Mg^{2+}) pour les Cations, et les Chlorures (Cl^-), les Sulfates (SO_4^{--}) et les Bicarbonates (HCO_3^{--}) pour les Anions.

En plus des mesures des paramètres de pollutions ont été également effectuées tel que les Nitrates et les Nitrites (NO_3^- et NO_2^-) ainsi que les Phosphates (PO_4^{--}) et enfin les teneurs en Silicium (SiO_2^-) dissout.

Le tableau ci-contre (Tab. n°1) résume les méthodologies ainsi que le matériel avec le quel ont été procédés les mesures pour chaque élément chimique.

Il est à signaler que sur les 472 résultats d'échantillons analysés et a ayant servis pour définir les différents faciès chimiques des eaux, 172 d'entre eux nous ont aidés pour le traitement statistique.

Pour ce qui est du traitement des données et résultats hydro-chimiques, nous avons utilisés comme outils : AqaQ pour fiabiliser la balance ionique, Diagramme pour définir le faciès chimique caractérisant les eaux de la zone d'étude par le biais du modèle Piper et enfin à l'aide de Xlstat et Statistica (StatSoft Inc, 2004), et ce pour tester l'origine, la variabilité et l'évolution spatiale du chimisme des différents éléments chimiques en utilisant les méthodes de l'ACP et le CHA.

4.1. Description des méthodes ACP & CHA.

Les deux méthodes statistiques appartiennent à la famille de l'analyse factorielle des données statistiques multivariées.

Ce type de méthodes fût être utilisé pour la première fois par Karl Pearson dans un article publié en 1901.

Ces approches géométriques et statistiques à la fois, sont des méthodes fréquemment utilisées par les praticiens dans le cas de traitement des données qui présentaient un nombre important de variables puisqu'elles leurs permettent d'une part de réduire le nombre de variables et d'autre part de définir les relations qui peuvent se présenter entre elles.

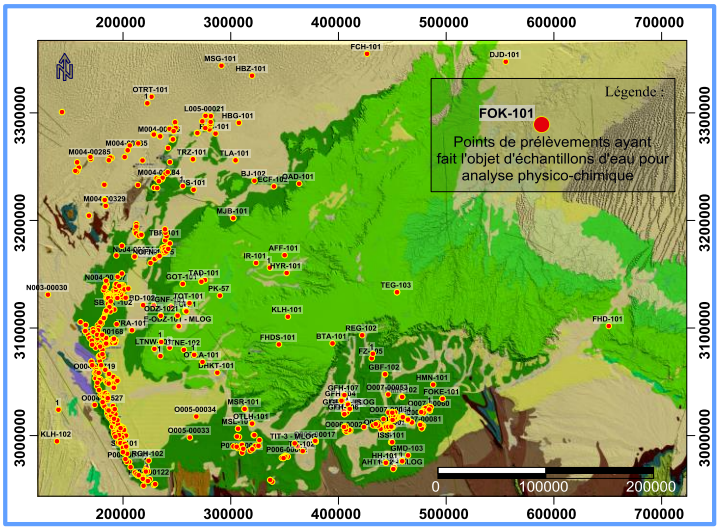


Fig.6. Carte de situation des 472 points d'eau (Inventoriés et échantillonnés en 2012)

Paramètres	*Méthodes*	*Equipements*
pH	Electrométrie	pH mètre portable
C.E	Conductimétrie	Conductivimètre portable
Ca^{2+}, Mg^{2+}	Complexomètrie de l'EDTA	Verrerie et réactifs
HCO_3^-	Volumétrique	Verrerie et réactifs
Cl^-, SO_4^{2-}	Spectrophotométrie	DR 2000 - HACHE
Na^+, K^+	Spectrophotométrie	Spectrophotomètre Atomique à Flamme
PO^-_4, NO_3^-	Spectrophotométrie	"
SiO_2^-	Spectrophotométrie	"

Tab.1. Méthodes et outils utilisés pour analyses Physico-chimiques

4.2. Différence entre la méthode ACP & CHA.

La différence entre les deux approches ACP et CHA est que l'ACP permet une représentation de la répartition spatiale des données alors que la CHA permet de les classées d'une manière à définir la liaison qui relie entre ces données ou variables.

4.3. Vérification de la validité des résultats.

Pour vérifier la fiabilité des résultats, d'après (Lalbat, 2006), si le coefficient de corrélation est supérieur à 0,70 pour une régression linéaire entre la somme des concentrations des anions en fonction des cations, la corrélation est représentative.

Pour le cas de notre étude, (la figure n°6) résume les résultats obtenus, elle met en évidence un coefficient de celle des cations, cela implique que la corrélation est corrélation d'une valeur de 0,97, celui-ci traduit une bonne corrélation linéaire entre les deux variables et par conséquent on peut donc conclure que les résultats d'analyses sont fiables.

5. Résultats et discussions.

Les résultats d'analyses physicochimiques effectuées sur les eaux albiennes de la zone d'étude comparées aux normes éditées par l'OMS (Tab. n°2), montrent que les eaux qui caractérisent la zone d'étude se localisent non loin des normes. Cependant des valeurs de certains paramètres dépassent largement les limites (mentionnées en rouge), par exemple le Résidu sec et la Conductivité passent du simple au double. Cette hausse peut être due à la matrice lithologique de la formation aquifère. Les eaux à forte conductivité sont localisées en aval de la zone d'étude c'est à dire au Sud (région de In Salah au Tidikelt).

Quant au pH des eaux qui correspond à l'intensité de l'acidité ou de l'alcalinité, mesure la concentration en ions hydronium dans l'eau. Le pH des eaux analysées varie entre 5,6 à 9 unités pH, avec une moyenne de 7,42 d'où le pH de ces eaux se situe dans les normes.

Les concentrations excessives en Sulfate dissouts dans l'eau indiquent que la matrice aquifère est riche en gypses. Dans le cas présent, les fortes concentrations en SO_4 ont été enregistrées en amont de la zone d'étude, à Timimoune au Gourara avec des valeurs qui varient entre (600 et 1200) mg/L. Pour le Calcium (Ca), on remarque que l'intervalle de concentration de cet élément varie entre (9 et 536) mg/L.

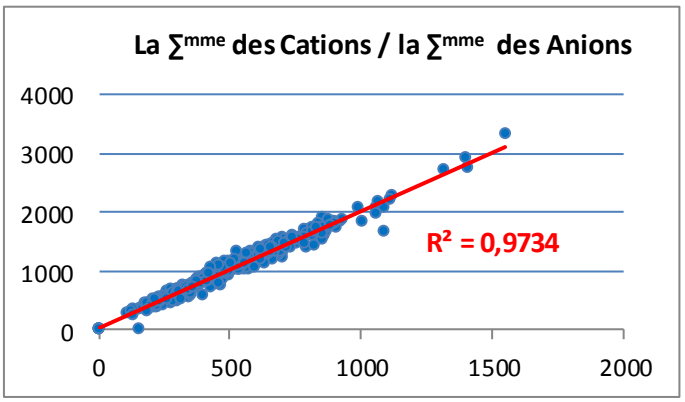


Fig.6. Corrélation entre la ∑ des anions et la ∑ des cations.

Paramètres et Unités		Normes. OMS	Min.	Max.	Moyenne
Ph	-	6,5 – 8,5	5,56	9,22	**7,42**
C.E	µS /cm	180 – 1000	585	5800	**2181,43**
T.D.S	mg/L	< 1000	389	5200	**1589,76**
PO_4	mg/L	≤ 0,2	0,00	10	**0,11**
NO_3	mg/L	≤ 50	1,00	214	**45,41**
Ca	mg/L	200	9,00	536	**114,21**
Mg	mg/L	150	3,00	255	**74,01**
Na	mg/L	≤ 200	22,2	1208	**279,92**
K	mg/L	≤ 12	3,90	160	**27,21**
F	mg/L	< 1,5	0,40	2,63	**0,89**
HCO_3	mg/L	450	2,40	280	**131,33**
Cl	mg/L	≤ 250	150	1200	**432,35**
SO_4	mg/L	≤ 500	31,2	2100	**444,43**
SiO_2	mg/L	-	1,10	68	17,61

Tab.2. Comparaison des résultats par rapport aux normes de l'OMS.

Pour le Calcium (Ca), on remarque que l'intervalle de concentration de cet élément varie entre (9 et 536) mg/L. Les grandes valeurs se situent dans les mêmes endroits que celles enregistrées par les SO_4, cela confirme l'importance de la formation gypsifère au Nord de la zone d'étude. Quant aux chlorures (Cl) qui dépassent largement les normes admises par l'OMS, leurs concentrations varient entre (150 et 2100) mg/L qui se localisent au Nord et au Sud de la zone. Le Fluor (F) et les Ortho-phosphates (PO_4) ne marquent pas de valeurs

élevées sur l'ensemble de l'aire de l'étude, cependant des concentrations qui dépassent les limites ont été enregistrées dans certaines localités notamment au niveau d'Aourir Akbour et sur l'axe Tinakline – Tiberghamine situées au Sud de Timimoune (au Nord de la zone d'étude) et aussi sur l'axe Igosten – Foggaret Laârab à In Salah au Tidikelt (extrême Sud de l'aire de l'étude).

Il est à signaler également l'existence d'une évolution de faciès du Chloruré et Sulfaté Calcique vers le Chloruré Sodique et Sulfaté Sodique, et ce de l'amont vers l'aval selon le sens d'écoulement des eaux de la nappe (voir sens de la flèche).

5.1. Diagramme de Piper.

Dans le but de bien mener notre étude, il a été jugé utile de s'appuyer sur l'utilisation l'analyse de certains diagrammes et outils de minéralisations tel que (diagramme de Piper). Le diagramme de Piper permet de mieux caractériser les faciès géo-chimiques des eaux. Il est très fréquemment utilisé dans ce type d'approches puisqu'il donne de très bons résultats (Yermani et al, 2003 ; Allassane, 2004; Tabouche et Achour, 2004 ; Gouaidia, 2008 ; Oga et al., 2009 ; Kouassi et al., 2010 ; Yao et al., 2010 ; Ahoussi et al., 2011 ; Kouassi et al., 2012).

La représentation des résultats d'analyses chimiques dans le diagramme de Piper (Fig. n° 7) nous a permis d'identifier 6 classes de faciès chimiques différents : Chloruré Sodique, Sulfaté Sodique, Chloruré Calcique, Chloruré Magnésien, Sulfaté Calcique et Sulfaté Magnésien. Néanmoins et comme l'indique la carte ci-contre (Fig. n°8), on remarque une nette dominance de 2 principales familles d'eau, la famille des eaux Chlorurées Sodiques qui représente 73% de la totalité des échantillons et celle des eaux Sulfatées Sodiques qui occupe les 21%. Le reste des autres faciès ne représente que 5% de l'ensemble des échantillons analysés.

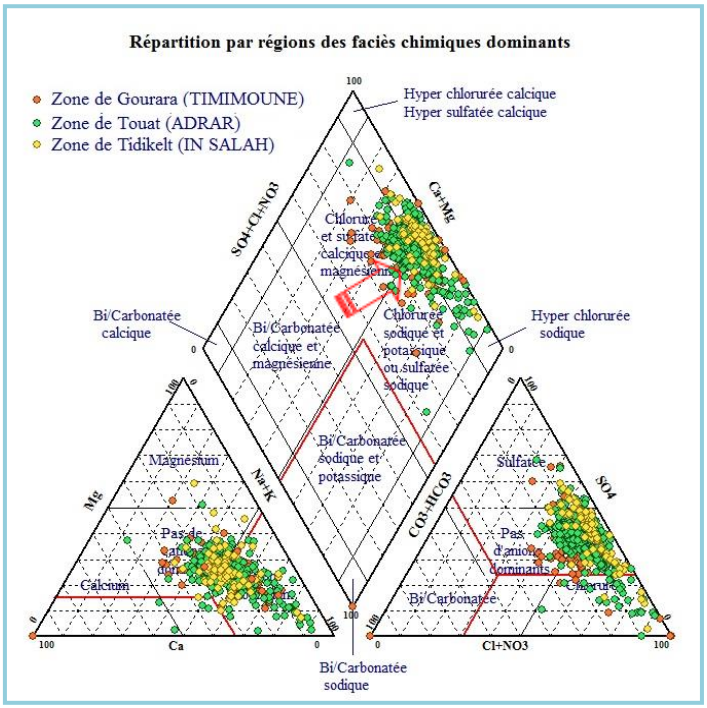


Fig.7. Diagramme de Piper des eaux de la nappe de la zone d'étude

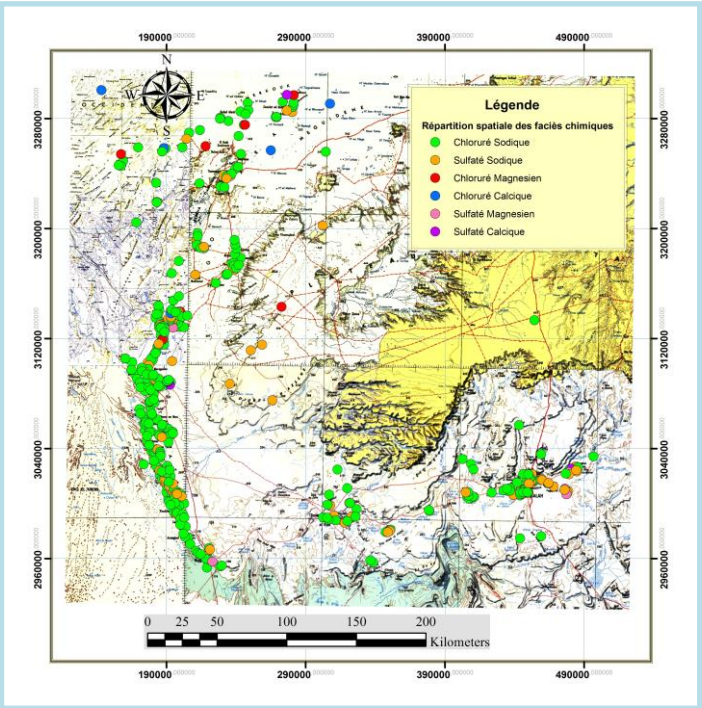


Fig.8. Répartition spatiale des différents faciès Identifiés par le diagramme de Piper

Il est à signaler que les échantillons d'eau prélevés à partir des 5 forages situés au niveau du plateau du Tademaït se caractérisent seulement par un faciès chimique de type Sulfaté Sodique.

La représentation graphique mettant en évidence le rapport ($Ca+Mg+HCO_3$) / ($Na+Cl+SO_4$) en fonction de la C.E des eaux (Fig. n°9), montre que la salinité des eaux des 3 régions représentatives de la zone d'étude, visualise la liaison directe avec l'effet des évaporites pour la plus part des échantillons prélevés.

En plus on remarque que la salinité de l'eau augmente progressivement de l'amont vers l'aval, suivant le sens d'écoulement de la nappe.

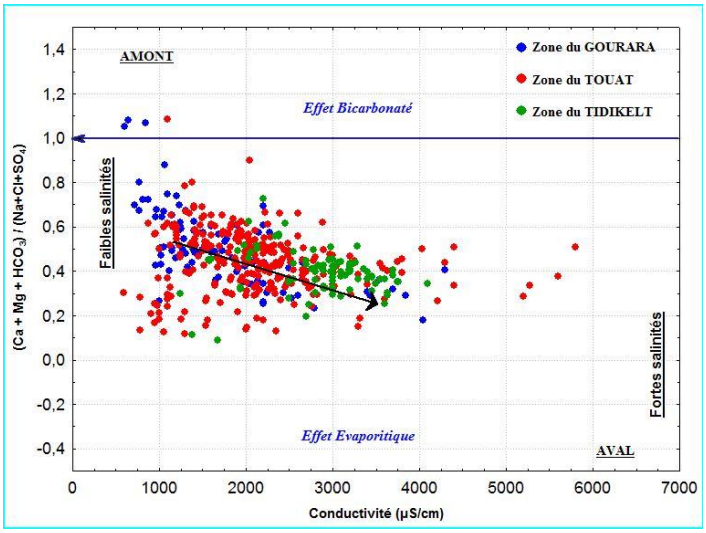


Fig.9. Représentation graphique du rapport ($Ca+Mg+HCO_3$) avec la CE de l'eau.

5.2. Interprétation des analyses statistiques.

5.2.1. Corrélation entre les variables.

Les résultats de l'analyse en composante principale sont représentés respectivement sur les tableaux (Tab. n°3 & n°4) et la fig. n°10).

Le coefficient de corrélation met en évidence la liaison existante entre les 12 paramètres prises 2 à 2 sur la matrice de corrélation (voir Tab. n°3).

On remarque que la conductivité électrique est bien corrélée avec l'ensemble des éléments chimique mais fortement avec le Na (0,91), le Cl (0,90), le SO_4 (0,91) et le K (0,57). En même temps par des valeurs moindres avec le (SO_4).

Les ions Cl sont corrélés du même coefficient avec le Ca (0,66), le Mg (0,69), le K (0,60) et le SO_4 (0,66), mais fortement corrélés avec le Na (0,91). Les paramètres de pollution notamment le Fluor (F) et les Nitrates (NO_3) ne montrent aucune corrélation avec les autres variables.

On remarque également que le Na est fortement corrélé avec le Cl (0,91), SO_4 (0,76) et le K (0,49) mais très faiblement avec le HCO_3 (0,10).

Pour le Mg, on constate qu'il fortement corrélé avec le SO_4 (0,82) et respectivement de la même valeur avec le Na et le Cl (0,62).

En fin pour le K, il présente une corrélation avec les Cl (0,60) mais d'un degré moindre avec le SO_4 (0,46).

On peut dire que les fortes corrélations entre ces paramètres mettent en évidence la ressemblance des phénomènes qui ont une relation avec l'origine de la mise en circulation de ces ions dans les eaux souterraines de la zone d'étude.

Variables	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	RS	Cd	pH	NO_3^{-}	F^{-}
Ca^{2+}	1											
Mg^{2+}	**0,768**	1										
Na^{+}	**0,646**	**0,616**	1									
K^{+}	**0,408**	**0,509**	**0,485**	1								
HCO_3^{-}	0,261	0,298	0,103	0,022	1							
SO_4^{2-}	**0,894**	**0,818**	**0,758**	**0,456**	**0,171**	1						
Cl^{-}	**0,664**	**0,691**	**0,913**	**0,600**	0,097	**0,657**	1					
RS	**0,877**	**0,842**	**0,901**	**0,567**	**0,226**	**0,923**	**0,881**	1				
Cd	**0,857**	**0,837**	**0,914**	**0,568**	0,205	**0,907**	**0,901**	**0,990**	1			
pH	**-0,358**	**-0,376**	-0,059	-0,111	**-0,418**	**-0,292**	-0,104	**-0,253**	**-0,250**	1		
NO_3^{-}	0,074	0,066	0,015	-0,067	0,100	0,052	-0,006	0,048	0,037	-0,002	1	
F^{-}	0,145	0,105	0,147	0,055	-0,143	0,143	0,158	0,145	0,149	0,051	0,118	1

Tab.3. Matrice de corrélations intermédiaires entre les différents paramètres.

5.2.2. Analyse en Composantes Principales.

Les ACP effectuées ont été élaborées selon le tableau ci-contre (Tab. n°4), avec 172 échantillons des 472 prélevés par la sélection de 12 variables.

Mais dans le but de définir les sources possibles de la variance dans les 172 données, (Kaisser, 1960) propose un critère sur lequel on détermine le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère seuls les facteurs ayant des valeurs propres supérieures ou égales à 1 seront retenus. Sur cette base 3 composantes (Facteurs) ont été maintenus où les résultats ont représentés une variance cumulée de l'ordre de 75,65% de la variance totale des 172 échantillons.

Comme l'indique le (Tab. n°5), le facteur de variabilité qui représente plus de 53% de la variance pour F1 est déterminé positivement pour les paramètres suivants : (Ca, Mg, Na, K, Cl, TDS et CE), mais avec des valeurs moindres pour le (HCO_3, NO_3 et F). Ce facteur peut correspondre chimiquement au contrôle de la minéralisation sous l'effet du contact entre la formation encaissante et l'eau, par l'influence de la conductivité électrique. Le facteur F2, il peut correspondre à l'influence des formations carbonatées sous l'effet des réactions ioniques entre la roche et l'eau de la nappe.

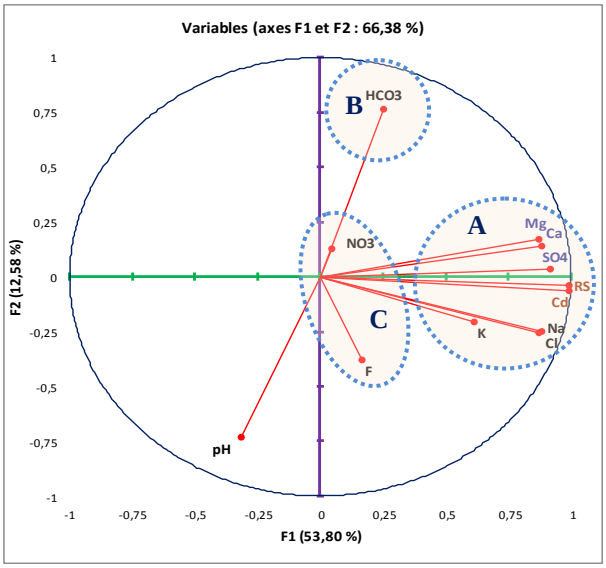


Fig.10. Projection spatiale des 12 variables sur le plan factoriel (F1 x F2)

Quant au facteur F3 qui représente une variabilité de 9%, est déterminé positivement avec le (NO_3) et le (F), peut être affecté au processus de contamination ou pollution.

Var.	Nbr. Ech.	Min.	Max.	Moy.	Ecart-type
Ca^{2+}	172	13	536	115,0	73,8
Mg^{2+}	172	3	255	73,8	42,7
Na^{+}	172	22	790	272,2	137,6
K^{+}	172	7	150	27,2	17,6
HCO^{-}_3	172	18,3	280	131,9	44,2
SO^{2-}_4	172	35	2100	448,2	305,2
Cl^{-}	172	80	1200	420,8	207,2
R.S	172	400	5200	1572,4	761,9
C.E	172	585	5800	2154,7	885,7
pH	172	6,7	9,1	7,4	0,5
NO^{-}_3	172	1,5	180	45,7	30,9
F^{-}	172	0,4	2,6	0,9	0,4

Tab.3. Statistiques élémentaires des 172 échantillons sélectionnés.

Variables	*F1*	*F2*	*F3*
Ca^{2+}	**0,882**	0,142	0,088
Mg^{2+}	**0,873**	0,17	0,021
Na^{+}	**0,875**	-0,257	-0,044
K^{+}	**0,614**	-0,205	-0,261
HCO^{-}_3	0,252	**0,765**	0,042
SO^{2-}_4	**0,916**	0,033	0,05
Cl^{-}	**0,881**	-0,249	-0,085
R.S	**0,992**	-0,041	-0,003
C.E	**0,99**	-0,063	-0,013
pH	-0,315	-0,734	0,013
NO^{-}_3	0,049	0,125	**0,817**
F^{-}	0,165	-0,378	**0,607**

Facteurs	**F1**	**F2**	**F3**
Valeur propre	6,456	1,51	1,126
Variabilité (%)	53,797	12,582	9,386
% cumulé	53,797	66,38	**75,765**

Tab.4 & 5. Corrélation des variables par rapport aux facteurs significatifs avec variance.

Les résultats des Analyses en Composantes Principales représentés graphiquement sur les (Fig. n°10 & n°11), montrent que la conductivité se situe dans le même champ que le Na, Cl et K (en bonne corrélation avec ces 3 paramètres), ceci explique que l'origine de la minéralisation qui caractérise les eaux albiennes dans cette partie occidental du SASS est contrôlé par la conductivité, et ce suite à la forte évaporation qui lui caractérise.

Le K se retrouve partiellement associé avec les autres paramètres. (L. Sahry, et al, 2017), à confirmer dans son étude de cette nappe (Albienne) dans la partie orientale du bassin, cet élément (K) ce comporte tout seul, et ce suite à la contribution des silicates dans l'enrichissement du Potassium K qui peut être due à l'altération des roches suite au phénomène d'hydrolyse.

L'emplacement du pH en opposition avec le HCO_3 par rapport à l'axe horizontal indique le rôle important de ce paramètre dans les équilibres Calco-carbonique.

Le Ca, Mg, et SO_4 se situent à proximité dans le même champ, ceci explique qu'ils sont régis par le même mécanisme hydro-chimique qui affecte la matrice de la formation aquifère.

Il s'avère d'après l'ACP que l'ensemble des variables ne présentent aucun lien avec le pH et le HCO_3. Pour le NO_3 et le F, leur rapprochement du centre des axes factoriels indiquent que la source de ces 2 éléments ne peut pas être d'origine géologique.

On peut en déduire du graphique de l'ACP, l'existence de 2 familles de minéralisation : évaporitique (A) et carbonatée (B) mais avec une influence très insignifiante, avec l'influence d'une pollution d'origine entropique (C).

5.2.3. Classification Hiérarchique Ascendante.

Le principe de cette répartition, est d'établir un arbre de classification (Dendrogramme) en se basant sur la distance existant entre chaque individu pris deux à deux, de tel sorte que plus la distance entre deux observations est importante plus la liaison entre les variables est dissemblable.

D'après le dendrogramme de la CHA (Fig. n°12), les résultats obtenus à partir de ce dernier confirment ceux soutirés avec les 2 ACP (Fig. n°10 & n°11).

Pour cela cinq classes ont été déduite, les classes n°1 et n°2 correspondent à la minéralisation par la participation des cinq principaux ions habituels : Ca, Mg, Na, Cl et SO_4 avec une contribution partielle de K, où cette minéralisation est régie par deux paramètres, la Conductivité et le Résidu Sec.

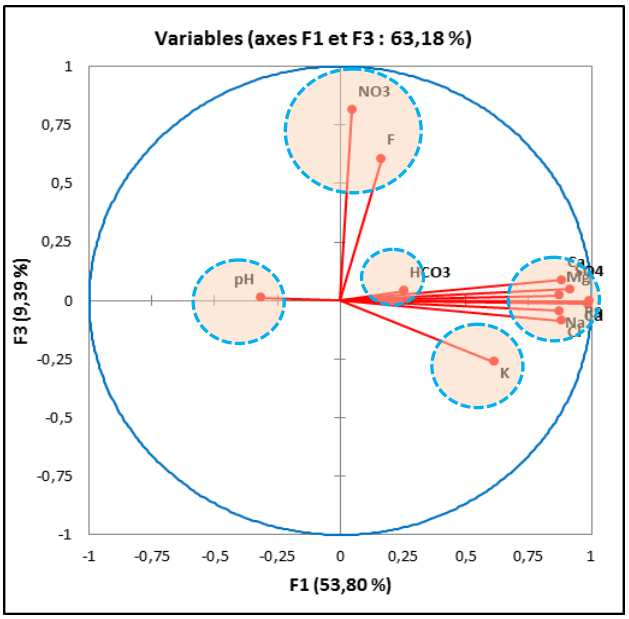


Fig.11. Projection spatiale des 12 variables sur Le plan factoriel (F1 x F3)

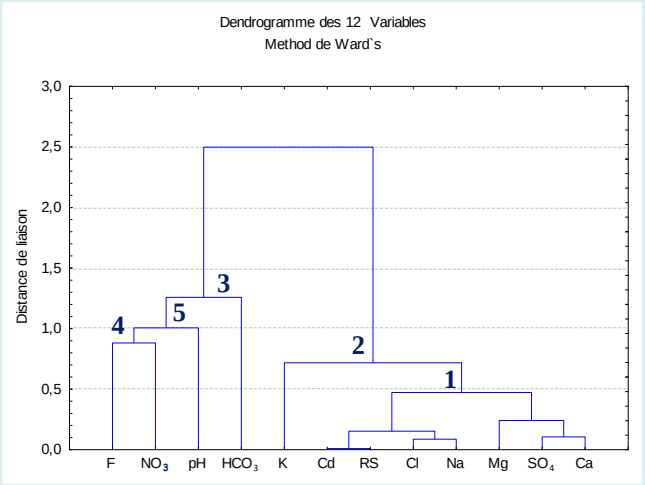


Fig.12. Classification Hiérarchique Ascendante (C.H.A)

La classe n°3 représentée par les bicarbonates, indique l'existence d'eaux issues des formations carbonatées.

La classe n°4, correspond au pôle d'une pollution nitratée et fluorée. En fin la classe n°5, correspond au rôle important que peut jouer le pH dans le mécanisme hydrogéochimique des 11 paramètres à l'échelle de la nappe.

6. Conclusion.

A l'égard de cette étude, et sur la base des résultats d'analyses chimiques des échantillons d'eau prélevés, nous ont permis de dégager les caractéristiques du comportement géochimique de certains paramètres responsables de la minéralisation de l'eau dans cette partie occidentale du bassin SASS.

Le traitement des résultats d'analyses physicochimiques montrent que les eaux se caractérisent par un pH supérieur à 7 (basique), deux principales familles de faciès chimiques définissent les eaux de la région et se regroupent autour des eaux Chlorurées Sodiques et Sulfatées. La caractérisation hydro-chimique a permis de montrer que les différents processus responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines sont principalement l'interaction entre l'eau et la formation encaissante qui est en grande partie à base de grès riches en évaporites, ainsi que le temps de séjour.

L'ACP, a montré que l'étude de la minéralisation des eaux souterraines étudiées dépend de trois facteurs principaux avec une variance totale de 75,76%, où F1 correspond à la minéralisation, F2 au mécanisme que peut jouer le pH dans le contrôle des équilibres Calco-carbonique et les bicarbonates, F3 peut être affecté aux paramètres de pollution notamment le Nitrate et le Fluor.

Les résultats obtenus à partir de l'ACP et le CHA confirment que les variables responsables de la minéralisation de l'eau sont principalement liées à la conductivité et aux espèces ioniques en solution tels que : SO_4^{2-}, Mg^{2+}, Cl^-, Na^+, K^+ et Ca^{2+}.

Pour les paramètres de pollutions notamment le NO_3 et F, leurs origine n'est pas géologique mais plutôt entropique, vue la zone d'étude est à caractère agricole et que certaines localités sont dépourvue de réseau d'assainissement.

REFERENCES

[01] **ABOUBAKER M, (2012) :** Caractérisation d'un système aquifère volcanique par approche couplée hydrogéochimique et modélisation numérique. Exemple de l'aquifère des basaltes de Dalha, sud-ouest de la République de Djibouti. Thèse. Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers. France. 239p.

[02] **A.C.P,** Analyse en Composantes Principales (avec SPAD) - Et Classification Ascendante Hiérarchique Michel Tenenhau (p.p.t).

[03] **A.C.P Martin, (1908) :** Les oasis sahariennes (Gourara-Touat-Tidikelt), Ed. SNED - Imprimerie Algérienne, 406p. Alger

[04] **ANRH - Direction Régionale Sud-Est Ouargla DRSE. (2002)**, Inventaire des points des points d'eau et enquête sur les débits extraits de la zone d'In Salah (W de Tamanrasset). 43p.

[05] **ANRH - Direction Régionale Sud-Ouest Adrar DRSO. (2008),** Projet de réalisation d'un piézomètre de 600 ML au niveau du champ de captage d'In Salah.

[06] **ANRH - Direction Régionale Sud-Ouest Adrar DRSO. (2011)**, Interprétation des données des essais de pompages des forages implantés de long de la zone Touat - Gourara - Tidikelt.

[07] **BENHAMIDA. S, et al,** Sources of chemistry of the albian waters under arid conditions. Application to the western regions of the Algerian Sahara. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon.

[08] **BISSON J. 2003**. Myths and Realities of a Coveted Desert, the Sahara. Paris: L'Harmattan, 72–93. (in French).

[09] **BRAHIM O.A. Ould Dick, 2017.** Suivi de la qualité physico-chimique de l'eau de la rive droite du fleuve Enega : Cas du captage de la prise d'eau à Keurmacen alimentant en eau la ville de Nouakchott. International Journal of advanced research (2017) - 389-404

[10] **C.K. Tay, (2017).** Application of multivariate statistical technique for hydrogeochemical assessment of groundwater within the Lower Pra Basin, Ghana. Appl Water Sci (2017) 7:1131–1150

[11] **CASTANY G. (1982) :** Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod université Bordas Paris. France, 237 p.

[12] **C.D.A.R.S, (1999) :** Étude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, Ressources en eau : Connaissances d'ensemble, Ouargla, 154p.

[13] **CONRAD G. (1975) :** Les isotopes dans les eaux du Sahara nord-occidental (Algérie), Rapport IAEA, 74p.

[14] **CONRAD G. (1969) :** L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, CNRS, Paris, 527p.

[15] **DUNALD Langmuir. (1997) :** Aqueous Environnemental Geochemistry, Imprimerie des Etats Unies d'Amérique, Université de Colorado. 618p.

[16] **DAHALI S., 2013** – Etude hydrogéologique et hydrochimique de la nappe du continentale intercalaire de la région de Touat Wilaya d'Adrar. Mem. Master. Ouargla. P78.

[17] **E.R.E.S.S, (1972).** Study of the Water ressources Septentrional Sahar, (Falls n° 02), p.122.

[18] **FABRE J. (2005) :** Géologie du Sahara occidental et central, musée royal de l'Afrique centrale - Belgique, 610p.

[19] **FABRE J. (1976) :** Introduction à la géologie du Sahara algérien. SNED, Alger, Algérie, 422p.

[20] **GOUAIDIA, L., (2008).** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana, Nord-Est algérien.

[21] **H. SCHOELLER,** La classification géo-chimique des eaux.

[22] **HAOUA AMADOU, 2014.** Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux de la zone de Zinder (Sud-Est du Niger).

[23] **KOUANI A., El Jamali S. et Talbi M., (2007) -** Analyse en composantes principales : Une méthode factorielle pour traiter les données didactiques, Pub.Radisma, numéro 2, 2007.

[24] **KOUASSI AM, Yao KA, Ahoussi KE, Seki CL,Yao NA, Kouassi KI. (2010).** Apports des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux des aquifères fissurés de la région du Nzi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 4(5): 1816-1838.

[25] **L. SAHRI,. (2017).** A Statistical Summary of ground water mineralization in the Aquifer of I.C (Algerian Septentrional Sahara) -
International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES17, 21-24 April 2017, Beirut Lebanon.

[26] **PEARSON K (1901).** On lines and planes of closest fit to systems of points in space. Philos Mag 2(6):559–572.

[27] **PIPER, A.M., 1944.** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water ana- lyses. Trans. Am. Geophysics. Union 25, 914–923.

[28] **RODIER, J (1996).** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 8ème Edition, Ed. Dunod, Paris.

[29] **HENRY F. Kaiser, 1960.** The Application of Electronic Computers to Factor Analysis, First Published April 1, 1960.

[30] **O.M.S. 2008.** Guidelines for Drinking-Water Quality (3rd edn). OMS: Geneva; 515.

[31] **O.S.S, Aquifer System of the Northern Sahara.** Ed. Observatory of the Sahara and the Sahel, Tunis,(2003),p. 147.

[32] **OULD BABA SY, M., Besbes.** M., Holocene recharge and present recharge of the Saharian aquifers. A study by numerical modeling, International Symposium Management of large aquifers - May 30-June 1, (2006), Dijon, France.

[33] **U.N.E.S.C.O, Project Reg 100.** Study of the water resources of the northern Sahara. Report on the results of the project, Paris, (1972), p 100.