

Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des causses de Sefrou et de l'Anoceur (Moyen Atlas marocain) par les méthodes hydrogéochimiques et statistiques

Characterization of the mineralization of groundwater of Sefrou and Anoceur causses (Moroccan Middle Atlas) by the hydrogeochemicals and statisticals methods

Bouhsine EL FELLAH IDRISSI¹ & Said HINAJE²

Abstract: The groundwater of Sefrou and Anoceur causses circulates essentially in the brecciated dolomites of the lower Lias And also in the tholeiitic basalts of upper Triassic-lower Lias age. These basalts appear at Mimet and Bhalil in NW of the area. This groundwater is characterized by the spatial variation of the mineralization of its waters whose the electrical conductivity ranges from 300 to 3050 µs/cm. The application of the hydrochemical and the multivariable statistics methods (the cluster analysis and the principal analysis component (ACP)) on the results of the chemical analyses, reveal that the mineralization of waters is connected to the variables group of Cl⁻, Mg²⁺ and HCO³⁻. These elements result from the dissolution of the aquifer formations and from the sole triasic rich evaporites (gypsum, salt). The second group including PT (phosphore total), SO₄²⁻, NO³⁻, and Ca²⁺ reflects a contamination of the groundwater under the effects of the anthropogenic activities. The SO₄²⁻ and Ca²⁺ may also come from the washing of the triasics deposits rich on evaporites and in elements resulting from tholeiitics basalts. Waters of the zone of study, are bicarbonate calco-magnesian characterizing a low mineralization waters, and chlorured bicarbonate calco-magnesian or chlorured sulphate calco-magnesian characterizing waters with high mineralization. The comparison of the chemical composition and the characteristic reports Mg²⁺/Ca²⁺ of waters of both aquifers, shows that these waters belong to the same family characterized by the predominance of elements originating in a carbonates (dolomites).

Keywords: Moroccan Middle Atlas, Sefrou and Anoceur causses, Groundwater, Mineralization, Hydrochemistry, Statistical analysis.

Résumé : La nappe phréatique des Causses de Sefrou et de l'Anoceur circule essentiellement dans les dolomies brèchiques du Lias inférieur et aussi dans les basaltes tholeiitiques du Trias supérieur-Lias inférieur. Ces basaltes affleurent à Mimet et à Bhalil situées au NW de la zone. Cette nappe est caractérisée par la variation spatiale de la minéralisation de ses eaux dont la conductivité électrique va de 300 à 3050 μs/cm. L'application des méthodes hydrochimiques et de la statistique multivariables (l'analyse cluster et l'analyse en composante principale (ACP)) sur les résultats des analyses chimiques, révèle que la minéralisation des eaux est liée à deux groupes de variables. Le premier groupe est représenté par Cl⁻, Mg²⁺ et HCO₃⁻. Ces éléments proviennent de la dissolution des formations aquifères et des argiles triasiques riches en évaporites (gypse, sel). Le deuxième groupe comprenant PT (phosphore total), SO₄²⁻, NO₃⁻, et Ca²⁺ traduit une contamination de la nappe sous les effets des activités anthropiques. Le SO₄²⁻ et Ca²⁺ peuvent provenir aussi du lessivage des dépôts triasiques riches en évaporites et en éléments provenant des basaltes tholéiitiques. Les eaux de la zone d'étude sont bicarbonatées calcomagnésiennes caractérisant des eaux de faible minéralisation, et chlorurées bicarbonatées calco-magnésiennes ou chlorurées sulfatées calco-magnésiennes caractérisant des eaux à haute minéralisation. La comparaison de la composition chimique et des rapports caractéristiques Mg²⁺/Ca²⁺ des eaux des deux aquifères, montre que ces eaux appartiennent à une même famille caractérisée par la prédominance des éléments provenant des carbonates (dolomies).

Mots-clés : Moyen Atlas marocain, Causses de Sefrou et de l'Anoceur, Eaux de la nappe, Minéralisation, Hydrochimie, Analyse statistique.

Laboratoire des Sciences de la Vie et de la Terre, Centre Régionale des Métiers d'Education et de Formation & Laboratoire de Géosciences Marines et Sciences du Sol, Université Chouaib Doukkali, Faculté des Sciences, El Jadida, Maroc. E.mail : fellahbouhsine@yahoo.fr

Laboratoire de Géo Ressources et Environnement, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Faculté des Sciences et

² Laboratoire de Géo Ressources et Environnement, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Faculté des Sciences et Techniques, Fès-Saïs, Maroc. E.mail : hinajesaid@yahoo.fr

INTRODUCTION

Les Causses de Sefrou et de l'Anoceur qui font partie du Moyen Atlas septentrional, sont caractérisés par la présence d'importantes ressources en eau superficielles et souterraines. La présence de ces ressources est favorisée par la situation géographique, les constitutions lithologiques et la structure de ces deux causses où les dolomies liasiques jouent le rôle prédominant dans l'hydrogéologie de la zone. Ces dolomies bréchiques contiennent une nappe importante qui assure l'alimentation en eau potable de la ville de Sefrou, Bhalil et les zones limitrophes. Cette nappe apparaît en surface dans certaines dépressions tectono-karstiques en formant des lacs ou « Dayats » comme le lac d'Afourgagh, ou donne naissance à de nombreuses sources (Aïn Regrag, Aïn El Ouata, Aïn Ghazi, Aïn Jorf...). La nappe circule aussi au niveau des basaltes tholéiitiques du Trias supérieur-Lias inférieur (COUSMINER & MANSPEIZER, 1976 ; BIRON & COURTINAT, 1982 ; BAUDELOT *et al.*, 1986 ; SABAOUI, 1987). Ces basaltes affleurent dans la région de Mimet – Bhalil-Bni Mellala située au NW de la zone

Cette nappe présente une variation spatiale de la minéralisation de ses eaux dont la conductivité électrique que nous avons mesurée varie de 300 à 3050 µs/cm. L'étude de l'évolution spatiale des paramètres physicochimiques, nous a permis de déceler les éléments responsables de cette minéralisation et de comprendre le comportement de la nappe vis à vis des échanges de matière avec son encaissant. Ce dernier agit par la nature lithologique de ses couches sur l'évolution hydrochimique de la nappe. Cette étude nous a permis aussi de faire un diagnostic de la nappe vis à vis des effets exogènes liés aux différentes activités humaines agricoles et domestiques. Ainsi les objectifs de ce travail sont l'identification des faciès chimiques des eaux, les facteurs contrôlant leurs géochimies et leurs évolutions dans l'espace, et l'évaluation de leurs qualités.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Situation géographique

Le secteur d'étude, concerne deux unités structurales qui se situent dans la partie septentrionale du causse moyen atlasique. Il s'agit des causses de Sefrou et de l'Anoceur.

Cette zone se situe à 20 km à vol d'oiseau au SE de la ville de Fès et à 46 km au NW de Boulemane. Elle est limitée au nord par la plaine de Saïs, à l'ouest et au SW par le causse d'Imouzzer, au sud par le causse de Guigou et à l'est par le moyen Atlas plissé (Fig.1).

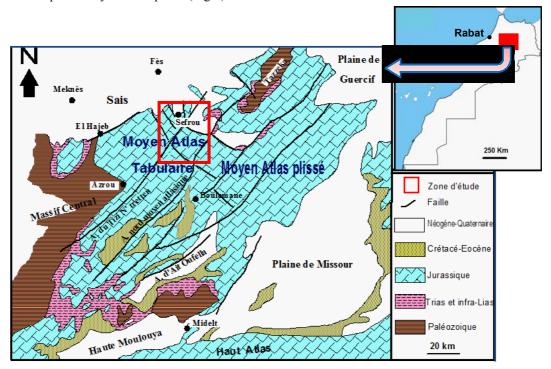


Figure.1: Carte structurale du Moyen Atlas et situation du domaine d'étude (Carte géologique du Maroc au 1/1000 000; HINAJE, 2004 ; redessinée).

Contexte géologique

La zone d'étude est constituée par des formations d'âge et de nature lithologique variés (Fig. 2). La série lithostratigraphique comprend du plus ancien vers le plus récent les formations suivantes :

- + les formations paléozoïques : n'affleurent que très peu dans la zone d'étude, où elles apparaissent sous forme de boutonnières. Celles-ci sont dégagées suite aux jeux tectoniques alpins des failles de directions NE-SW et NW-SE (CHARRIERE, 1990 ; HINAJE, 2004) ;
- + les formations du Trias supérieur-Lias inférieur : affleurent sur les bordures de la boutonnière de Kandar à l'ouest, au N et au SW de Bhalil et à l'est, dans la région de Bsabis, Zgane et Kliâ où elles jalonnent l'accident nord moyen-atlasique. Ces dépôts sont constitués d'argiles rouges à traces de gypse et de sel. Une importante couche de basalte doléritique, interstratifiée dans ces argilites rouges du Trias supérieur-Lias inférieur, sépare une formation sédimentaire rouge inférieure, d'une formation rouge supérieure à évaporites ;

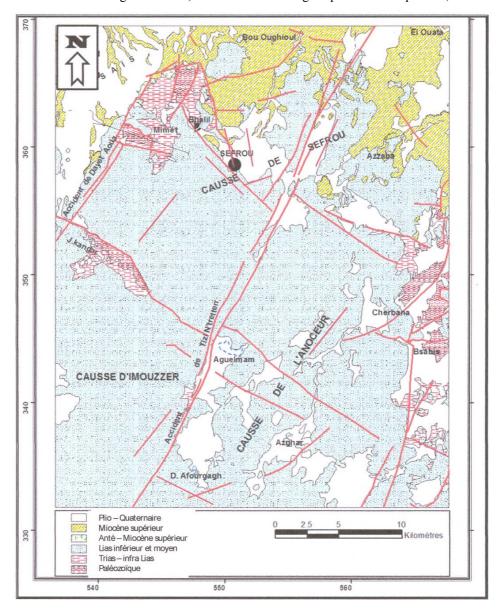


Figure 2 : Carte géologique de la région étudiée (Carte géologique du Maroc - Sefrou : au 1/100 000, modifiée).

- + la formation du Lias inférieur : caractérisée essentiellement par des dolomies qui couvrent en concordance les formations rouges triasico-liasiques, sur la majeure partie de la zone d'étude. Ces dolomies présentent une lithologie variable ; elles sont le plus souvent bréchiques s'altérant en sable dolomitique ;
- + les formations du Miocène supérieur : affleurent au nord de la zone, dans la dépression de Sefrou et son avant pays (MARTIN, 1981 ; CHARRIERE, 1990 ; EL HAMZAOUI, 1994 ; SABAOUI, 1998 ; HINAJE et al.,

2002). Ces formations sont représentées par des molasses discontinues à la base et les calcaires de Bhalil qui forment la base des couches tortono-messiniennes, les silts ocres de Sefrou, et enfin les marnes sableuses et les marnes bleues de Fès (CHARRIERE, 1990, HINAJE, 2004);

+ les formations du Plio-Quaternaire : elles sont caractérisées par des dépôts continentaux fluvio-lacustres et travertineux. Ces dépôts sont localisés dans des bassins intra-montagneux à style tectonique extensif (GOURARI, 2001; HINAJE, 2004).

Contexte hydrogéologique de la zone d'étude

Les causses de Sefrou et de L'Anoceur sont séparés par l'accident de Tizi'N Tretten orienté NE-SW et par d'autres failles transverses orientées NW-SE. Ils sont en communication entre eux et forment une seule unité hydrogéologique. Ces deux causses sont constitués essentiellement d'une puissante série carbonatée (de l'ordre de 200m), généralement dolomitique.

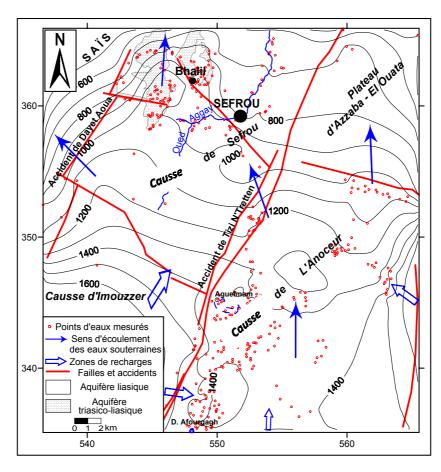


Figure 3 : Carte piézométrique de la nappe du secteur d'étude (Juillet, Août et Septembre 2003) (EL FELLAH IDRISSI, 2010).

Ces dolomies du Lias inférieur possèdent une double porosité, l'une d'interstice et l'autre de fissure. Cette couche aquifère renferme une importante nappe d'eau qui est retenue par un plancher imperméable constitué d'argilites rouges du Trias supérieur-Lias inférieur. Toutefois on constate d'autres circulations de celleci au niveau des basaltes tholéiitiques de Mimet et de Bhalil, situées au NW de la zone.

Ces basaltes présentent en surface une intense altération en boule et des niveaux calcaires silicifiés intercalés. L'étude réalisée par A. DEKAYIR *et al.* (2002) sur la partie altérée (8m de profondeur du profil d'altération) de ces basaltes, montre qu'elle est traversée par un réseau dense de fissures remplies de quartz, et que la porosité diminue généralement du haut vers le bas du profil d'altération.

Toutes ces caractéristiques permettent à cet aquifère basaltique de contenir une nappe d'eau superficielle dont la semelle imperméable est formée par la cohérence du basalte en profondeur (à 8m de profondeur la porosité = 0%) et par les argiles rouges inférieurs (EL FELLAH IDRISSI *et al.*, 2006 ; EL FELLAH IDRISSI, 2010).

La nappe liasique du domaine d'étude est caractérisée par un écoulement général qui se fait du sud vers le nord (Fig. 3). Au niveau des bassins d'effondrements (Afourgagh, Aguelmam Anoceur et Sefrou), les écoulements de cette nappe deviennent convergeants. L'alimentation de la nappe est assurée soit par les infiltrations directes à partir des eaux de pluie, soit par alimentation souterraine à partir des bordures est, sud et ouest. Ces zones d'alimentation sont représentées par des réservoirs calcaro-dolomitiques. Le flux régional de la nappe est orienté vers le bassin de Saïs et le couloir sud rifain où la nappe devient captive.

MATERIEL ET METHODES

Méthode d'échantillonnage et d'analyse

Les points d'échantillonnage des eaux ont été choisis de telle sorte qu'ils soient répartis d'une façon homogène dans toute la surface de la zone étudiée. Ils concernent les puits et les sources captant la nappe phréatique qui est contenue dans les basaltes triasico-liasiques et dans les dolomies liasiques.

La compagne d'échantillonnage des eaux a été réalisée en novembre et décembre 2004 selon un réseau comprenant une trentaine de points d'eau. Ces points d'eaux sont destinés à l'alimentation des populations et servent pour l'irrigation et l'usage domestique. L'un des forages (1472/22) d'alimentation en eau potable de la ville de Sefrou, en plus des eaux du lac Dayet Afourgagh, ont été inclus dans le réseau de contrôle hydrochimique (Fig. 4).

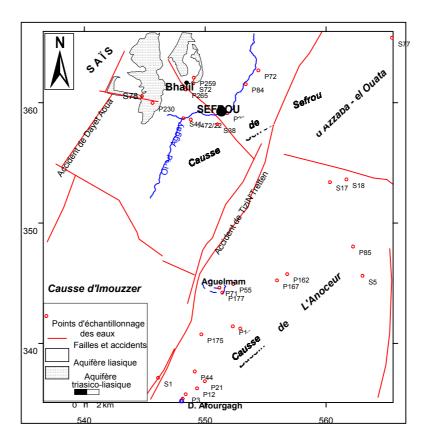


Figure 4 : Localisation géographique des points d'échantillonnage des eaux.

Les paramètres physiques comme la conductivité, la salinité et la température ont été déterminées *in situ* par un conductimètre portatif. Cette étape est suivie par l'opération de la fixation de l'oxygène dissout. Les échantillons sont conservés dans des bouteilles à usage sanitaires et préalablement lavées. Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de la Régie Autonome de Distribution des Eaux et d'Electricité (RADEEF) et au laboratoire de l'Office National des Eaux Potables (ONEP) de Fès. Les protocoles d'analyses suivies pour la détermination des différents constituants chimiques sont ceux définis par J. RODIER (1996). Le calcium (Ca²⁺), le magnésium (Mg²⁺), les bicarbonates (HCO₃-), les chlorures (Cl⁻) et l'oxygène dissous (O₂d.) sont déterminés par la méthode titrimétrique (volumétrique). La détermination des nitrates (NO₃-), des sulfates (SO₄²⁻) et le

phosphore total (PT) a été effectuée par spectrophotométrie d'absorption moléculaire. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) par spectrophotométrie d'absorption atomique et le manganèse (Mn^{2^+}) par spectrophotométrie d'émission de flamme.

Méthode de traitement des données

Le traitement des résultats obtenus à partir des analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux de la nappe a été réalisé à l'aide de méthodes hydrochimiques et statistiques multivariées. Pour mieux connaître les faciès chimiques des eaux souterraines dans le secteur étudié, on a représenté les analyses chimiques dans le diagramme triangulaire de Piper et le diagramme vertical logarithmique de Schöeller — Berkaloff. Pour cette raison, on a fait usage du logiciel DIAGRAMME du laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon.

L'analyse statistique multivariables permet de classifier les échantillons d'eau, d'étudier la corrélation entre les variables et la similarité entre les observations. Les données de départ pour ce genre d'analyse, sont l'ensemble des observations et variables qui forment une matrice de dimension $n \times m$; n étant le nombre des observations et m celui des variables. Les variables sont des paramètres physico-chimiques, tandis que les observations correspondent aux différents points d'eau de la zone d'étude. Il s'agit donc d'une variation spatiale des différents paramètres physico-chimiques. Deux procédures ont été appliquées aux résultats bruts : l'analyse cluster et l'analyse en composante principale (ACP). L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA pour l'analyse cluster et du programme STAT pour l'ACP.

L'ACP décrite initialement par H. HOTELLING (1933), permet, selon J. DAGET (1976), de déterminer par l'interprétation de matrices de corrélations, un petit nombre d'axes (vecteurs propres ou 'composantes principales') expliquant le maximum de variance et selon lesquels on cherche une corrélation avec les paramètres physico-chimiques. C'est une méthode de réduction du nombre des variables permettant la représentation graphique des observations et des variables. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls (BOUROCHE & SAPORTA, 1980). La représentation graphique déduite permettant alors mieux l'interprétation que les données originales.

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques réalisées sur les eaux souterraines des causses de Sefrou et de l'Anoceur sont consignés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines des causses de Sefrou et de l'Anoceur en mg/L (Novembre et Décembre 2004).

Pointsd eau	Libellé	тъ	Cond (•/am)	pН	CI	Ca ²⁺	M g ²⁺	HCO3-	NO 3 ²⁻	SO 4 ²⁻	PT	M n ²⁺	K ⁺	Na⁺	O ₂ d
S1	Source	13,8	694	7,74	21,3	86,4	44,16	348,92	10,6	57,78	0,029	1,66	1,03	37,6	8,137
D Afourgagh	Iac	8,7	4310	8,21	866,2	64	301,44	1830	18,97	8	0,548	0,12	1,03	37,6	3,26
P3	puits	12,5	1630	7,19	241,4	128	13,92	544,12	4,44	26,67	0,869	0,38	1,03	37,6	4,06
P12	puits	13,9	890	7,09	42,6	120	7,68	478,24	29,06	22,56	0,00583	1,02	1,03	37,6	7,19
P21	puits	13,3	1696	7,43	92,3	200	95,04	514,84	14,96	22,56	0,023	0,64	1,03	37,6	4,07
P44	puits	15,1	669	7,44	35,5	84,8	37,44	370,88	13,82	22,56	0,013	0,38	1,03	37,6	7,19
P175	puits	15,9	468	7,64	14,2	72	16,8	226,92	35,29	22,56	0,00389	0,25	1,07	3	7,19
P71	puits	13,8	837	7,5	49,7	75,2	51,84	336,72	78,7	36	0,033	0,25	1,03	37,6	6,5
P55	puits	14,1	590	7,79	49,7	68	41,76	319,64	15,2	44,4	0,328	0,38	1,03	37,6	5,12
P143	puits	15	2730	7,79	624,8	93,6	84,48	488	21,8	18,2	0,058	0,38	1,03	37,6	5,67
S25	Source	14,3	1602	7,3	284	89,6	71,52	508,74	13,25	18,4	0,015	0,25	1,03	37,6	6,44
P162	puits	15,6	712	7,87	71	83,2	28,8	183	106,8	9,1	0,023	0,38	1,03	37,6	8,1
P167	puits	14,5	2640	7,57	624,8	81,6	96,96	437,98	21	29,8	0,06	0,38	1,03	37,6	7,24
P177	puits	13,1	834	7,46	49,7	78 A	47 D4	359,9	66,1	23	0,023	0,25	1,03	37,6	9,35
S17	Source	16,5	1937	7,21	376,3	85,6	52,8	453,84	17,74	15,8	0	0,48	1,03	37,6	9,76
S 5	Source	17,6	563	7,89	21,3	62,4	43,68	373,3	21,24	1,8	0	0,48	1,03	37,6	8,86
P85	puits	15,9	662	7,35	28 🔏	68	41,28	361,1	40,8	5,3	0	0,48	1,03	37,6	7,25
S18	Source	17,1	1366	7,2	213	82,4	44,64	429 44	19,3	8,2	0	0,48	1,28	132,3	6,51
S41	Source	14,5	658	7,4	21,3	72	37,44	380,64	22,3	2,2	0	0,48	1,03	37,6	8,11
1472/22	Forage	16,5	724	7,06	21,3	76	42	424 ß	12,6	0,44	0	0,48	1,03	37,6	8,95
s38	Source	16,5	601	7,41	14,2	62,4	32,2	319,64	30,2	2,7	0	0,48	0,46	8,8	7,29
P271	puits	14,8	800	7,17	28 🔏	73,6	46,56	451,4	27,9	6,2	0,05	0,48	1,03	37,6	6,48
S77	Source	18	1097	7,4	106,5	64,8	44,16	375,76	15,77	14,85	0,0526	0,48	1,12	84,7	13,83
P265	puits	17,6	525	7,82	17,75	56	29,76	300,12	27,33	11,84	0,041	0,48	1,03	37,6	7,29
S72	Source	16,4	851	7,56	63,9	122,4	9,12	240,34	131,08	14	0,416	0,48	2,35	22	8,95
P259	puits	14,4	2050	7,49	99,4	175,2	84,96	490,44	405,32	143,2	0,762	0,48	1,03	37,6	7,29
P72	puits	18	867	7,49	56,8	71,2	54,24	436,76	73,01	25,11	0,637	0,48	1,03	37,6	6,51
P84	puits	18	947	7,49	56,8	92,8	49,92	522,16	33,77	26,52	0,665	0,48	1,03	37,6	4,86
P230	puits	15,5	660	7,49	21,3	70,8	38 /4	408,7	47,44	19 🔏	0,16	0,48	0,4	7	7,19
<i>\$</i> 78	Source	17,7	701	7,49	25,5	77 A	40,1	396,5	47,44	17,7	0,16	0,48	0,53	5,6	7,19

Distribution spatiale de la conductivité (minéralisation) de la nappe

Pour l'étude de la répartition de la conductivité nous avons utilisé les mesures de la campagne que nous avons effectué en Juillet – Août 2003, vu le grand nombre de points de mesures (383 points). En plus, celles-ci constituent la base de la deuxième campagne d'échantillonnage des eaux de Novembre-Décembre 2004.

La conductivité électrique exprime la capacité de l'eau de conduire le courant électrique. La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation (sels dissous) globale de l'eau (RODIER, 1996).

La carte de distribution de la conductivité électrique de la nappe montre des subdivisions bien marquées (Fig. 5). On y distingue deux classes de secteurs. La première caractérisée par une plage de conductivité faible variant entre 300 et 1100μs/cm. Ces valeurs qui reflètent une minéralisation faible des eaux souterraines caractérisent en particulier, les zones de recharges du côté est (à Cheurbana) et ouest (apport du causse d'Imouzzer), les sous bassins d'Afourgagh et d'Aguelmam, et la totalité du bassin de Sefrou à l'exception de la ville de Bhalil. Dans celle-ci le brusque saut de la conductivité pourrait être le résultat de l'infiltration des eaux usées due à la présence des fosses septiques. La deuxième classe est caractérisée par une conductivité élevée variant entre 1100 et 3050μs/cm. Cette conductivité élevée est observée dans les secteurs de Dayet Afourgagh, Azghar, Mezdou au niveau du passage de l'Accident de Tizi N'Tretten et le long du couloir d'Aït Khalifa – Aït Halli. Dans ces secteurs, le gradient fort est signalé par le rapprochement des courbes d'égales valeurs de conductivité. La valeur maximale admissible, selon les normes marocaines de potabilité, est de 2700 □s/cm.

Les eaux du lac Afourgagh présentent la valeur la plus élevée (3050 µs/cm pour la campagne de Juillet – Août 2003 et 4310 µs/cm pour la campagne de Novembre – Décembre 2004). Ceci est dû à l'accumulation, dans les eaux de ce lac, des éléments minéraux provenant du lessivage de sol par les eaux de pluie. Ainsi vu la relation qui existe entre le lac d'Afourgagh et la nappe (EL FELLAH IDRISSI, 2010), la minéralisation de cette dernière devient plus importante aux environs de ce lac et s'atténue en s'éloignant de celui-ci. Chose que décèle l'impact de ce lac sur la qualité physico-chimique des eaux de la nappe.

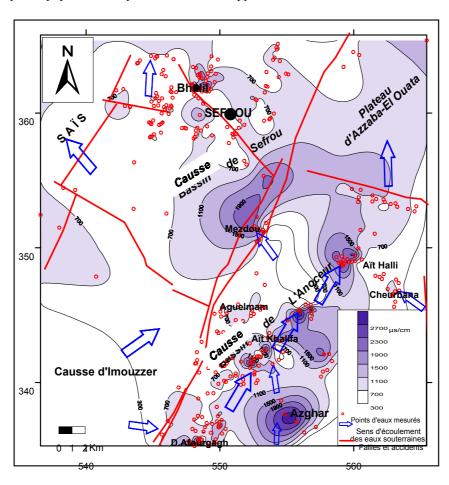


Figure 5: Distribution spatiale de la conductivité électrique dans les eaux souterraines des causses de Sefrou et de l'Anoceur (Juillet, Août et Septembre 2003).

Dans le couloir d'Aït Khalifa – Aït Halli, l'augmentation de la conductivité serait due, en plus de l'action de l'évapotranspiration qui affecte surtout la partie amont de ce couloir (émergence de la nappe par endroit), à l'existence d'un axe d'écoulement vers lequel sont entraînés et concentrés les éléments chimiques dissous. Cet axe est bien perceptible sur la carte piézométrique. En effet, ces éléments dissous sont apportés essentiellement par les eaux qui proviennent d'Azghar où la conductivité est élevée (2720µs/cm).

Enfin, il faut signaler que les mesures que nous avons effectuées dans le secteur, pendant les saisons d'hiver et d'été; nous ont montré que les eaux de la majorité des points d'eau mesurés subissent une augmentation de la conductivité en hiver et une diminution en été. En effet, durant l'été, l'évaporation provoque la concentration des sels dans la zone non saturée. Après les précipitations de la période pluvieuse, l'eau infiltrée entraîne la dissolution des sels par lessivage et l'augmentation de la conductivité.

La réglementation marocaine fixe la limite maximale de la conductivité pour que les eaux soient potables à la valeur 2700 s/cm. Quant à la qualité des eaux pour l'usage agricole, la classification de l'USSLS «UNITED STATE SALINITY LABORATORY STAFF (1954)» considère qu'à partir de 2250 s/cm il y a un grand risque de salinisation des sols.

Etude statistique multi-variée

Les traitements multivariables, nous ont permis de déceler les éléments responsables de la minéralisation des eaux souterraines des causses de Sefrou et de l'Anoceur.

Analyse Cluster

• Cluster des variables

Dans cette analyse, tous les points échantillonnés ont été étudiés et les paramètres considérées sont : T (°C), conductivité (μ s/cm), pH et la teneur en Ca²+, Mg²+, Na+, K+, Mn²+, Cl⁻, HCO₃-, NO₃-, SO₄²-, PT (Phosphore total), et O₂d (Oxygène dissous) (tous exprimés en mg/l). Ainsi le dendrogramme de ces variables permet l'identification de trois principaux groupes (Fig. 6).

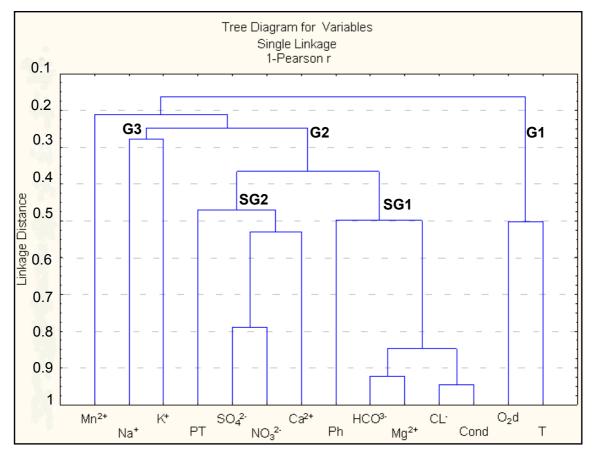


Figure 6 : Dendrogramme du cluster des variables (Novembre et Décembre 2004).

Le premier groupe (G1) est formé par la température et l'Oxygène dissous. La solubilité de ce dernier dans l'eau est fonction entre autres de la température, ce qui explique la liaison de ces deux variables qui ont une corrélation moyenne. Le deuxième groupe (G2) est divisé en deux sous-groupes : le sous-groupe (SG1) est formé par la conductivité, Cl⁻, Mg²⁺, HCO₃⁻ et le PH. Les quatre premières variables de ce sous groupe ont une forte corrélation qui dépasse 0.8, tandis que la corrélation entre ces quatre variables et le PH est faible. Ce sous-groupe est responsable de la minéralisation de l'eau. Le sous-groupe (SG2) comprend les variables PT, SO₄²⁻, NO₃, et Ca²⁺. Ce dernier contient des variables clairement liées aux processus de la pollution par les activités agricoles et /ou les eaux usées en plus des évaporites triasiques qui longent les failles. Le dernier groupe est formé par Na⁺ et K⁺ qui ont une très faible corrélation. Quant au Mn²⁺, il se joint au G2 et au G3 avec une très faible corrélation.

• Cluster des observations

L'analyse du dendrogramme des observations (Fig. 7) permet de distinguer deux familles de points d'eaux. La famille F1 est formée par les points P162, P259 et S72. Cette famille englobe les points pollués en particulier ceux qui ont des concentrations en NO₃⁻ dépassant 100 mg/l. La famille F2 est divisée en deux sousfamilles : SF1 intégrant les observations P3, P21, P143, P167, S17, S18, S25 et Dayet Afourgagh, qui ont une conductivité qui dépasse 1300 μS/cm et une teneur en ion chlorure entre 92,3 et 866,2 mg/l; la SF2 est formé par le reste des observations possédant une faible minéralisation (conductivité variant entre 468 et 1097 μS/cm).

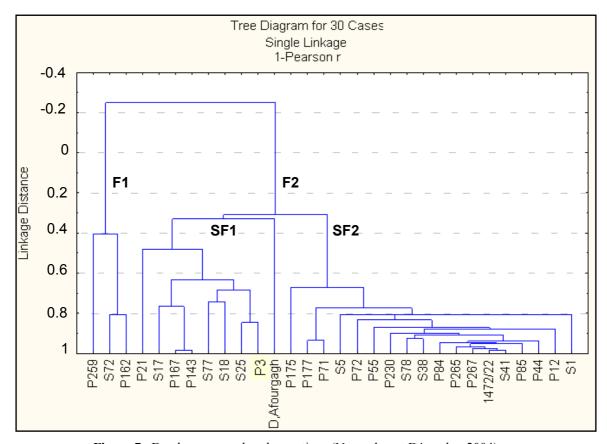


Figure 7 : Dendrogramme des observations (Novembre et Décembre 2004).

Analyse en Composantes Principales (ACP)

Pour observer la distribution des variables et des observations, on utilise les composantes principales les plus intéressantes. Pour cela, on compare entre les pourcentages de variances associés à chacun des vecteurs propres classés par ordre décroissant.

D'après l'analyse du tableau 2 de valeurs propres, trois axes principaux ont été considérés comme significatifs. Ces axes expliquent respectivement 34,42%, 23,43 et 12% de la variance totale. Le plan principal, ou plan I-II (les deux axes I et II), explique plus que la moitié (57,85% de la variance totale) de l'information, tandis que les trois premiers axes expliquent plus que les deux tiers (69,86%) de l'information.

Tableau 2 : Valeurs propres, pourcentage de variance expliquée et cumulée par chaque axe.

Vecteurs	Valeurs propres	% Variance	% Cumulé
V_1	3,786	34,42	34.42
V ₂	5,577	23,43	57,85
V_3	1,320	12	69,86
V_4	1,072	9,75	79,61
V_5	0,710	6,45	86,06
V_6	0,618	5,62	91,69
V ₇	0,429	3,90	95,59
V_8	0,307	2,79	98,39
V_9	0,158	1,44	99,83
V ₁₀	0,016	0,14	99,97
V ₁₁	0,002	0,21	100

• Etude des variables

A part le pH et l'Oxygène dissous, les variables utilisées pour ce traitement sont les même que celles utilisées pour le traitement précédent. Le pH n'a pas été retenu, vu que ce dernier n'a pas été mesuré *in situ*. Pour l'oxygène dissous, il forme des corrélations moins importantes avec les autres paramètres. Ainsi la projection des variables sur le plan principal I-II et I-III est représentée sur la figure 8.

L'axe principal (axe 1) regroupe les variables conductivité électrique (Cond), Mg²⁺, HCO₃ et Cl⁻. Ces variables se situent dans la partie positive de l'axe principal et maintiennent avec celui-ci des coefficients de corrélation supérieurs à 0,8 (Tab. 3). On déduit donc que la partie positive de l'axe 1 reflète le degré de minéralisation de l'eau. Les valeurs de la conductivité des eaux souterraines des réservoirs (Basaltes doléritiques et dolomies) de la zone d'étude se rapportent essentiellement à la présence des chlorures, du magnésium et des bicarbonates. Ces derniers sont bien corrélés avec la conductivité par des coefficients dépassant 0,7 (Tab. 4). Ces éléments ont comme origine la dissolution des formations aquifères et des dépôts triasiques riches en évaporites, et la contamination de la nappe par l'infiltration des eaux usées (cas du secteur de Bhalil) ou plus minéralisées comme le cas des eaux de Dayet Afourgagh saturées par lessivage des sols par les eaux de pluie.

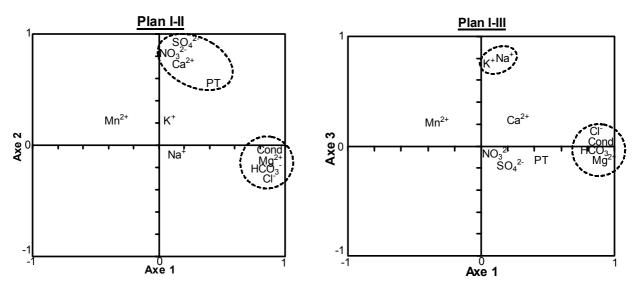


Figure 8 : Représentation graphique de l'ACP : distribution des variables.

L'axe II est associé aux variable NO₃-, SO₄²⁻ et Ca²⁺ avec des coefficients de corrélation dépassant 0,7. Le phosphore total, vu les faibles valeurs trouvées, ne contribue que moyennement à cet axe. Cependant, il s'avère intéressant d'intégrer cet élément dans le groupe précédant (NO₃-, SO₄²⁻ et Ca²⁺). L'axe II explique donc des indices de pollution de la nappe par activités agricoles, urbaines et/ou domestiques (fosses septiques). Ces indices de pollution ont été constatés dans les eaux de la source Ghaba (située à l'aval de Bhalil) qui présente des teneurs élevées du calcium et des nitrates (El Fellah Idrissi et al, 2016). On remarque aussi que Ca²⁺ et SO₄²⁻ sont bien corrélés entre eux, ce qui nous laisse à penser que l'origine de ces deux éléments peut provenir aussi de la dissolution du gypse présent dans les argiles triasiques, de l'oxydation de minéraux sulfurés et de la dissolution des pseudomorphes de gypse présent dans les formations réservoirs.

Le troisième axe est dominé par la teneur en Na^+ et K^+ , avec des coefficients supérieurs à 0,7. Ces deux éléments participent très peu à la minéralisation des eaux, et sont faiblement corrélés entre eux (Tab.4).

	Axe1	Axe2	Axe3
Cond	0,9619	-0,0195	0,0831
Mg ²⁺	0,919	-0,1602	-0,106
Ca⁺	0,1792	0,7267	0,1912
K ⁺	0,0558	0,2489	0,7462
Na⁺	0,1278	-0,0931	0,7824
Mn ²⁺	-0,3487	0,2178	0,1938
Cl	0,8798	-0,251	0,1044
SO ₄ ²⁻	0,1659	0,8729	-0,1383
HCO ₃	0,8939	-0,1886	-0,0948
NO ₃	0,1204	0,8566	-0,1227

Tableau 3: Corrélation entre les variables et les axes principaux.

Tableau 4 : Matrice de corrélation entre les variables physico-chimiques.

0,5604

-0,1342

0,4484

	Cond	Mg2 +	Ca+	· K+	N:	a+ M	n2+ C	I- S	D42- H	CO3- NO	D3- I
Cond	1										
Mg2+	0,84		1								
Ca+	0,23	(0,01	1							
<+	0,06	-(0,07	0,24	1						
Va+	0,16	(90,0	-0,0002	0,27	1					
√ln2+	-0,26	-(27	0,19	-0,0038	0,04	1				
CI-	0,94	. (76,	-0,0004	0,05	0,15	-0,3	1			
6042-	0,15	(0,05	0,52	0,0006	-0,04	0.21	-0,04	1		
1CO3-	0,79	(92	0,01	-0,0685	0,06	-0,21	0,7	-0,03	1	
103-	0,07		0,01	0,47	0.16	-0,09	-0,06	-0,13	0,78	-0.08	1

Faciès hydrochimique des eaux de la nappe

PT

Les traitements statistiques des données hydrochimiques, nous ont permis de mettre en évidence l'existence de deux groupes ou types d'eau. Pour mieux connaître les faciès chimiques de l'eau dans le secteur étudié, on a représenté les analyses chimiques dans le diagramme triangulaire de Piper et le diagramme vertical logarithmique de Schöeller- Berkaloff.

Vu le manque des résultats des ions Na⁺ et K⁺ pour certains points, on a étudié sept points d'eaux qui ont une bonne représentativité de la zone d'étude. En effet, l'aquifère triasico-infra liasique est représenté par deux points (P230 et S78), tandis que l'aquifère liasique est représenté par cinq points (P175, S18, S38, S72 et S77).

Dans le diagramme des anions de la représentation de piper (Fig. 9), les points se répartissent en deux groupes : le premier à évolution vers le pôle chloruré (S18, S72, et S77) et le deuxième vers le pôle bicarbonaté (P175, P230, S38 et S78). Dans le diagramme des cations, on distingue aussi deux groupes, l'un proche du pôle calcique et l'autre occupe le centre du diagramme (S18 et S77) sans cation dominant.

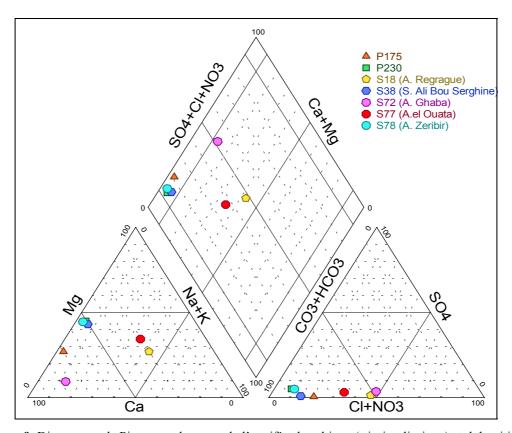


Figure 9: Diagramme de Piper pour les eaux de l'aquifère basaltique (triasico-liasique) et dolomitique (Lias inférieur).

Sur le diagramme de Schöeller – Berkaloff (Fig. 10), on constate que les courbes présentent deux types d'allures. Le premier type qui représente les points S18, S72 et S77, montre deux pics bien accusés : le premier correspond au chlorures et le second, beaucoup plus exprimé, aux bicarbonates. Quand au deuxième type qui représente les points S38, S78 et P175 et P230, il est marqué par trois pics correspondant aux bicarbonates, au magnésium et au calcium.

On peut conclure que les eaux de l'aquifère du Trias-infra Lias et celles du Lias inférieur, sont divisées en deux types : le premier type correspond à une eau bicarbonatée calco-magnésienne caractérisant des eaux de faible minéralisation et le deuxième représente une eau chlorurée bicarbonatée calco-magnésienne ou chlorurée sulfatée calco-magnésienne caractérisant des eaux à haute minéralisation (couloire Aït Khalifa – Aït Halli jusqu'à la source A. El Ouata).

D'après ces résultats, on constate que les eaux circulant dans le secteur de Mimet au niveau des basaltes triasico-infra liasiques, s'apparentent à celles qui circulent dans les dolomies liasiques. En effet, la comparaison de la composition chimique et des rapports caractéristiques Mg²⁺/Ca²⁺ des eaux de la nappe du Trias-infra Lias (S78 et P230) et de celle du Lias inférieur (S1, S38 et 1472/22) montre généralement le rapprochement de la concentration des éléments et la similitude des rapports (Mg²⁺/Ca²⁺) pour les eaux des deux formations (Tab. 5). Ceci nous permet de confirmer que ces eaux appartiennent à une même famille caractérisée par la prédominance des éléments provenant d'une formation carbonatée (dolomies). On constate donc que la transition des eaux des dolomies vers les basaltes s'effectue sans variation notable des caractéristiques physico-chimiques des eaux. Chose qui peut être due à l'altération des basaltes, de sa faible étendue et du court temps de séjour des eaux dans l'aquifère basaltique (EL FELLAH IDRISSI *et al.*, 2007).

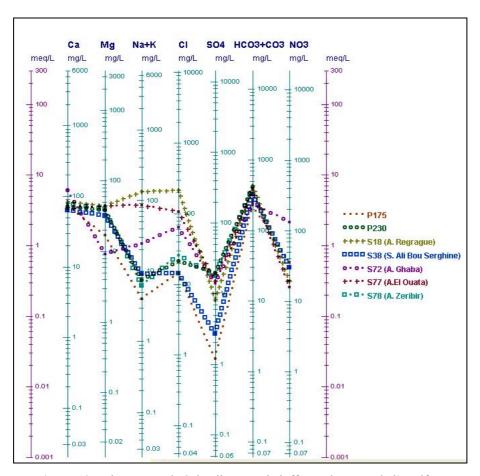


Figure 10 : Diagramme de Schöeller – Berkaloff pour les eaux de l'aquifère basaltique (triasico-liasique) et l'aquifère dolomitique (liasique).

Tableau 5: Rapports caractéristiques Mg²⁺/Ca²⁺ des eaux circulant dans les deux aquifères.

Aquifère	Points d'eaux	Mg ²⁺ /Ca ²⁺		
	S1	0,5111111		
Dolomies liasiques	1472/22	0,5526316		
·	S38	0,5160256		
Basaltes triasico-	P230	0,5423729		
infra liasiques	S78	0,5167526		

CONCLUSIONS

Dans les causses de Sefrou et de L'Anoceur, la nappe circulant dans l'aquifère basaltique (Trias supérieur-infra Lias) et l'aquifère dolomitique (Lias inférieur) est caractérisée par une variation spatiale de la minéralisation des eaux dont la conductivité électrique oscille entre 300 et 3050 µs/cm. Cette minéralisation peut être expliquée soit par le lessivage des dépôts triasiques riches en évaporites et en éléments provenant des basaltes tholéitiques, soit par l'altération des roches carbonatées lors de la karstification et le broyage tectonique. Ces trois phénomènes peuvent agir à la fois en libérant des anions et des cations (Cl⁻, SO₄²⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺...) qui se combinent pour former des sels dissous dont la concentration est accentuée par évaporation. Un autre facteur peut jouer aussi un rôle important dans la variation de la conductivité : il s'agit de la présence de minéralisations (en particulier les oxydes de fer) filoniennes hydrothermales dans les plans des failles (El Fellah Idrissi et al., 2009).

Les analyses statistiques multivariables (l'analyse cluster et l'ACP), nous a permis de constater que :

- la minéralisation des eaux souterraines se rapporte essentiellement à la présence des chlorures, du magnésium et des bicarbonates. Ces éléments ont comme origine la dissolution des formations aquifères et les dépôts triasiques riches en évaporites, et la contamination de la nappe par l'infiltration des eaux plus minéralisées comme le cas des eaux de Dayet Afourgagh et les eaux usées (cas du secteur de Bhalil). Les autres éléments ont un effet mineur sur la minéralisation de la nappe;
- le groupement des variables PT, $SO_4^{2^-}$, NO_3^- , et Ca^{2^+} est lié aux processus de la pollution de la nappe par les activités agricoles, urbaines et/ou domestiques (fosses septiques, cas de Bhalil). Le $SO_4^{2^-}$ et Ca^{2^+} peuvent provenir aussi du lessivage des dépôts triasiques riches en évaporites gypseuses.

La classification hydrochimique des eaux à partir du diagramme de Piper et de Schöeller-Berkaloff a montré que les eaux se classent en deux principaux hydrofaciès. Il s'agit des eaux bicarbonatées calcomagnésiennes, caractérisant des eaux de faible minéralisation, et des eaux chlorurées bicarbonatées calcomagnésiennes ou chlorurées sulfatées calco-magnésiennes caractérisant des eaux à haute minéralisation.

La comparaison de la composition chimique et des rapports caractéristiques Mg^{2^+}/Ca^{2^+} des eaux des deux aquifères, confirme que ces eaux appartiennent à une même famille caractérisée par la prédominance des éléments provenant des formations carbonatées (dolomies). En effet, la transition des eaux des dolomies vers les basaltes s'effectue sans variation notable des caractéristiques physico-chimiques des eaux. Ce qui peut être du à l'altération des basaltes, de leur faible étendue et du court temps de séjour des eaux dans l'aquifère basaltique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les propriétaires des puits, les personnels du laboratoire d'analyse des eaux de la RADEEF de Fès et plus particulièrement Monsieur HAJJI chef de ce laboratoire, M. EL MESBAHI, M. MRIOUAH, Z. EL MEKKOUDI et R. EL OUZZANI, et de l'ONEP, Monsieur DYOURI et Monsieur I.HAMADANI pour leurs collaborations.

BIBLIOGRAPHIE

BAUDELOT S., COLIN J.P. & OUARHACHE D. (1986). Le niveau sédimentaire associé aux basaltes triasiques sur la bordure septentrionale du causse d'El Hajeb (Maroc) : données palynologiques et micropaléontologiques (Ostracode). Revue de Paléobiologie de Genève, 5, 2 : 281-287.

BIRON P. E. & COURTINAT F. (1982). Contribution palynologique à la connaissance du Trias du Haut Atlas de Marrakech, Maroc, *Geobios*, 15: 231-235.

BOUROCHE J.M. & SAPORTA G. (1980). L'analyse des données. 4^{ème} Ed. Collection *Que sais-je?* Presses universitaires de France.

CARTE GEOLOGIQUE DU MAROC – SEFROU au 1/100000. Editions du Service Géologique du Maroc. Notes et Mémoires N°354 (1989).

CHARRIERE A. (1990). Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinental : le Moyen Atlas au SE de Fès (Maroc), Thèse de Doctorat d'Etat, Toulouse, 589p.

COUSMINER H. L., & MANSPEIZER W. (1976). Triassic pollen date Moroccan High Atlas and incipient rifting of Pangea as middle Carnian, *Science*, 191: 943-945.

DAGET J. (1976). Les modèles mathématiques en écologie. Masson, Paris New York Barcelone Milan. p:172. pp: 141-144. DEKAYIR A., DANOT M. & ALLALI N. (2002). Apports des phyllosilicates dans la différenciation entre altération hypogène et altération supergène dans le basalte triasique du Moyen Atlas (Maroc). *C. R. Géoscience*, 334.: 877-884.

EL FELLAH IDRISSI B. (2010). Influence de la tectonique cassante sur les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères triasico-liasiques et apport de l'hydrochimie à l'étude des eaux souterraines dans les causses de Sefrou et de L'Anoceur (Moyen Atlas septentrional, Maroc). Thèse de Doctorat National. Univ. Sidi Mohamed Ben Abdellah, FST Fès. 238p.

EL FELLAH IDRISSI B., HINAJE S. & LAHRACH A. (2006). Caractéristiques hydrogéologiques des aquifères triasicoliasiques : cas du bassin de Mimet (causse moyen atlasique, Maroc). 5^{ème} réunion du groupe marocaine du Permien et de Trias (GMPT5), El Jadida.

EL FELLAH IDRISSI B., HINAJE S. & LAHRACH A. (2007). Rôle hydrogéologique des fractures et leur influence sur la répartition des ressources en eau : cas des bassins de Sefrou et de l'Anoceur (Moyen Atlas, MAROC). 4ème Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement. Fac. Sci. Tétouan.

EL FELLAH IDRISSI B., HINAJE S. & LAHRACH A. (2009). Écoulement des eaux, évaluation de la charge minéralogique de la nappe et relation avec la fracturation : cas du bassin d'Afourgagh (Moyen Atlas). Revue *Géomaghrib*, 5 :

EL FELLAH IDRISSI B., HINAJE S., CHERAI B., & MEHDI K. (2016). Rôle de la fracturation dans la circulation des eaux souterraines et la répartition des sources : cas du bassin hydrogéologique de Sefrou (Moyen Atlas septentrional, Mroc). *European scientific journal*, 12, 24: 277-297.

EL HAMZAOUI O. (1994). Les affleurements récifaux du Miocène terminal au SE de Fès : Paléontologie, paléoécologie, et contrôle tectono-sédimentaire. Thèse 3^{ème} cycle, Fès, 560p.

GOURARI L. (2001). Etude hydrochimique, morphologique, lithostratigraphique, sédimen-tologique et pétrographique des dépôts travertino-détritiques actuels et plio-quaternaires du bassin karsique de l'oued Aggay (causse de Sefrou, Maroc). Thèse Doc. Etat, Univ. Fès, 408p.

HINAJE S., (2004). Tectonique cassante et paléochamps de contraintes dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas central (Midelt-Errachidia) depuis le Trias jusqu'à l'actuel. Thèse Doc. Etat, Univ. Rabat, 363p.

HINAJE S., AÏT BRAHIM L. & GOURARI L. (2002). Rôle de la tectonique cassante polyphasée (du Miocène supérieur à l'actuel) dans la genèse du tracé hydrographique de la vallée de l'Oued Aggay et l'effondrement du bassin de Sefrou (bordure NW du Moyen-Atlas, Maroc). *Africa Geoscience Review*, 9, 2 : 171-181.

HOTELLING, H., (1933). Analysis of a Complex of Statistical Variables Into Principal Components, *Journal of Educational Psychology*, 24: 417-441 and 498-520.

MARTIN J. (1981). Le Moyen Atlas central, étude géomorphologique. Note et Mémoire du Service Géologique. Maroc, n°258, 445p.

RODIER J. (1996). Analyses des eaux. Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eaux de mer. 8ième édition Dunod, Paris, 1384 p. SABAOUI A. (1987). Structure et évolution alpine du Moyen-Atlas septentrional sur la transversale Tleta des Zerarda – Merhraoua (Sud Ouest de Taza, Maroc). Thèse 3° cycle, Toulouse, 189 p.

SABAOUI A. (1998). Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen-Atlas Septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel – Ribat Al Khayr – BouIblane. Thèse Doct. Etat, Rabat, 410 p.

UNITED STATE SALINITY LABORATORY STAFF (1954). Soil and Water Conservation Research Branch. Agricultural Research Service, Agriculture Handbook N°60, 159p.