

Etude hydrochimique d'un aquifère en milieu fissuré: cas du Massif cristallophyllien d'Oulmès (Maroc)

S. DADI, M. BOUTALEB

ENIM, BP 753 avenue Hadj Ahmed Cherkaoui, Agdal-Rabat, Maroc

F. LAZIRI

Ministère de l'Energie et des Mines, Agdal-Rabat, Maroc

L. DEMASSIEUX

Laboratoire de Géomécanique, ENSG, INPL, France

A. DASSARGUES

Université de Liège, LGIH, B19-Sart Tilman, B-4000 Liège, Belgique

Résumé Pour connaître les mécanismes de transport des contaminants en milieu fissuré des zones semi-arides, nous menons une étude pilote dans le plateau d'Oulmès (Maroc). Pour cela, nous avons réalisé une étude hydrochimique en vue de déterminer les caractéristiques de la qualité des eaux souterraines du plateau, leur variabilité dans l'espace et les facteurs qui les régissent. Les résultats de cette étude nous ont permis de définir la composition physico-chimique des eaux et leurs regroupements en familles. L'existence d'une filiation entre les familles d'eaux et la lithologie a pu être montrée. La circulation des eaux suivant des zones et des directions privilégiées rend l'effet de la concentration sur la composition chimique des eaux souterraines négligeable. L'action anthropique a pour effet l'augmentation des concentrations en nitrates en certains points de la nappe.

INTRODUCTION

Le plateau d'Oulmès est situé à environ 150 km au sud-est de Rabat. Il présente un bassin versant de 132.3 km² formé d'un complexe de roches cristallines, cristallophylliennes et quartzitiques du paléozoïque (Termier *et al.*, 1950; Boutaleb, 1988; Tahiri, 1991). La circulation des eaux souterraines se fait le long des zones de conduits privilégiés qui sont essentiellement des fissures (Fig. 1). La qualité de ces eaux n'était approchée jusqu'à présent, que par les quelques analyses physico-chimiques réalisées à l'occasion des premiers travaux de reconnaissance et d'essais hydrogéologiques par forages, exécutés en 1982. Pour cela, nous avons réalisé une étude hydrochimique systématique en effectuant deux campagnes de prélèvements en période d'étiage (1995-1996) sur 20 puits uniformément répartis dans l'espace.

Nous présentons ici une étude détaillée des résultats physico-chimiques, le but étant de déterminer les caractéristiques de la qualité des eaux souterraines, leur variabilité dans l'espace, et de mettre en évidence les facteurs régissant cette variabilité.

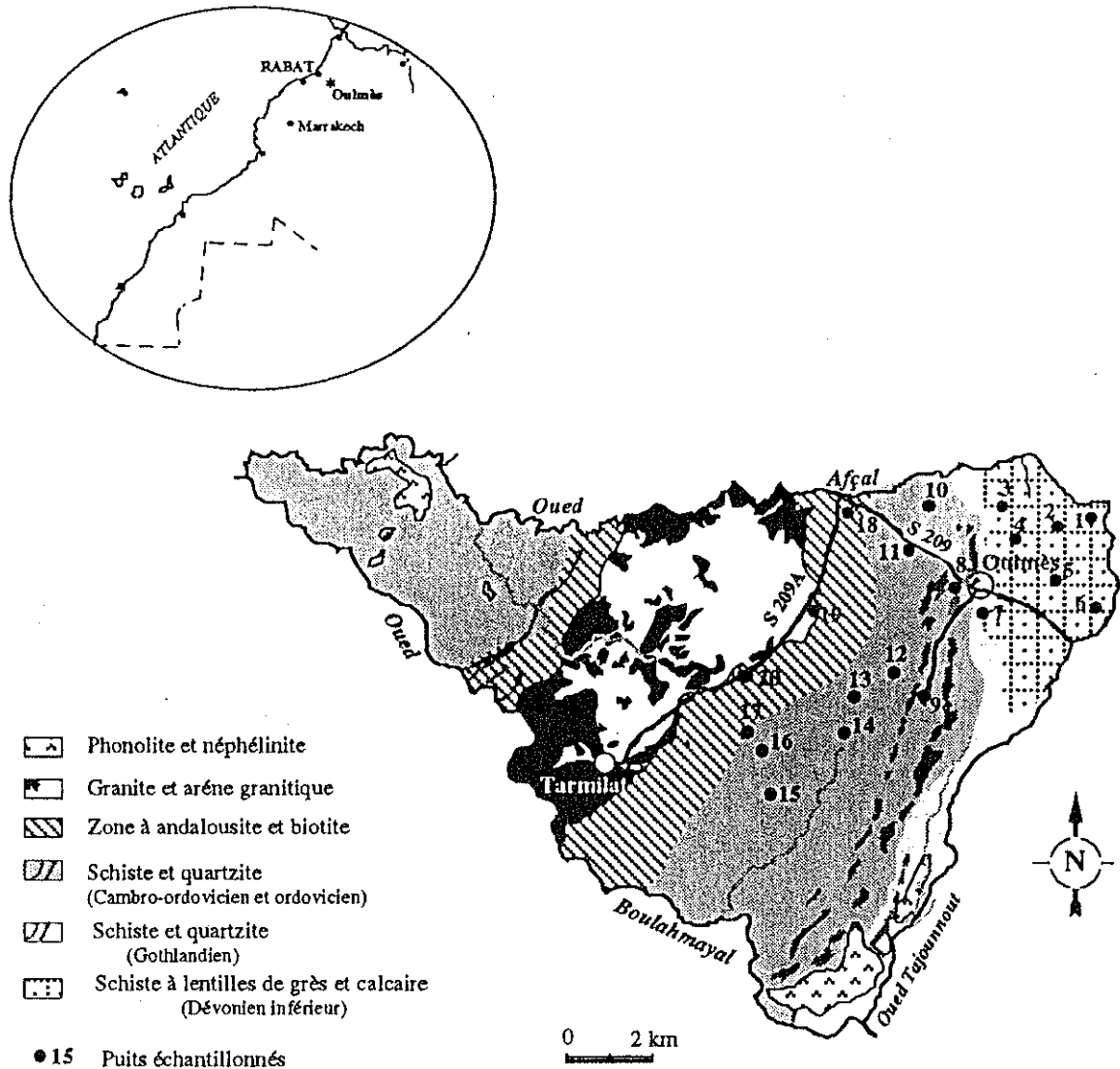


Fig. 1 Carte géologique synthétique du plateau d'Oulmès et position des puits échantillonnés.

MINERALISATION GLOBALE DES EAUX

Les eaux souterraines du plateau d'Oulmès ont une minéralisation relativement faible et présentent les caractéristiques suivantes (Tableau 1):

- elles sont relativement douces, à pH acide et à dominance bicarbonatée calcique avec

pour les cations: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$

et pour les anions: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$

- les teneurs moyennes des éléments en solution sont très faibles, inférieures à 2 milliéquivalent par litre;
- l'ensemble des paramètres physico-chimiques mesurés a des valeurs moyennes et extrêmes en dessous de la limite de qualité des eaux potables à l'exception des valeurs extrêmes des nitrates.

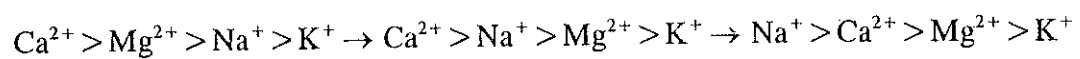
ETUDE DU FACIÈS CHIMIQUE DES EAUX

Pour étudier le faciès chimique des eaux souterraines dans le plateau d'Oulmès, nous avons projeté le chimisme des puits échantillonnés dans le diagramme de Piper (Piper, 1944). L'utilisation de ce diagramme a été facilitée par son automatisation grâce au logiciel OTPIPER que nous avons mis au point sur PC (Laziri *et al.*, 1996). Les résultats des projections sont portés sur la Fig. 2. La position géographique des puits utilisés est donnée dans la carte géologique synthétique de la Fig. 1. L'étude du comportement des eaux sur le plateau sera considérée dans chaque partie du diagramme.

Comportement des eaux dans le triangle des cations

Dans ce triangle, les eaux des différents puits se regroupent essentiellement en trois grandes familles, que nous désignons par: A, B et C. Ces familles se distinguent par l'ordre d'abondance des cations et par leurs rapports caractéristiques. Ainsi:

- les eaux de la famille A sont calciques avec des concentrations relatives élevées en calcium et magnésium représentant plus de 83% de la charge cationique totale;
 - les eaux de la famille B se présentent dans un faciès mixte avec enrichissement en magnésium, mais reste malgré tout dominé par le sodium;
 - les eaux de la famille C sont sodiques avec des concentrations relatives élevées en sodium et potassium, représentant plus de 70% de la charge cationique totale.
- L'itinéraire cationique en allant des familles A à C est le suivant:



Il en résulte un rapport alcalin/calcium augmentant de A vers C. Il est en effet,

Tableau 1 Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux souterraines dans le plateau d'Oulmès et dans ses différents domaines (1995/1996).

	Plateau d'Oulmès	Domaine I	Domaine II	Domaine III	Domaine IV
Conductivité ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	316.72	483.00	179.75	336.17	88.73
pH terrain	6.61	7.23	6.46	6.46	5.97
Résidu sec (105°C)	231.67	339.40	140.58	241.77	87.08
TH (d° Fr)	12.94	23.66	7.43	11.02	1.17
Ca ²⁺ (mg l ⁻¹)	34.45	75.56	21.25	25.00	3.04
Mg ²⁺ (mg l ⁻¹)	10.46	8.11	4.81	11.43	1.03
Na ⁺ (mg l ⁻¹)	14.62	10.10	3.48	24.95	12.60
K ⁺ (mg l ⁻¹)	0.83	0.59	0.64	1.36	1.27
SO ₄ ²⁻ (mg l ⁻¹)	39.28	52.08	7.90	64.63	2.97
Cl ⁻ (mg l ⁻¹)	17	18.07	11.15	24.20	11.41
NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	18.29	36.17	17.58	1.48	7.67
HCO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)	109.16	192.10	60.70	97.48	23.13
Mg/Ca	0.50	0.18	0.37	0.75	0.56
Na/K	29.95	29.20	9.20	31.23	16.91
(Na+K)/Ca	0.38	0.12	0.16	0.90	3.83

* Rq: Les rapports sont calculés à partir de valeurs exprimées en milliéquivalent.

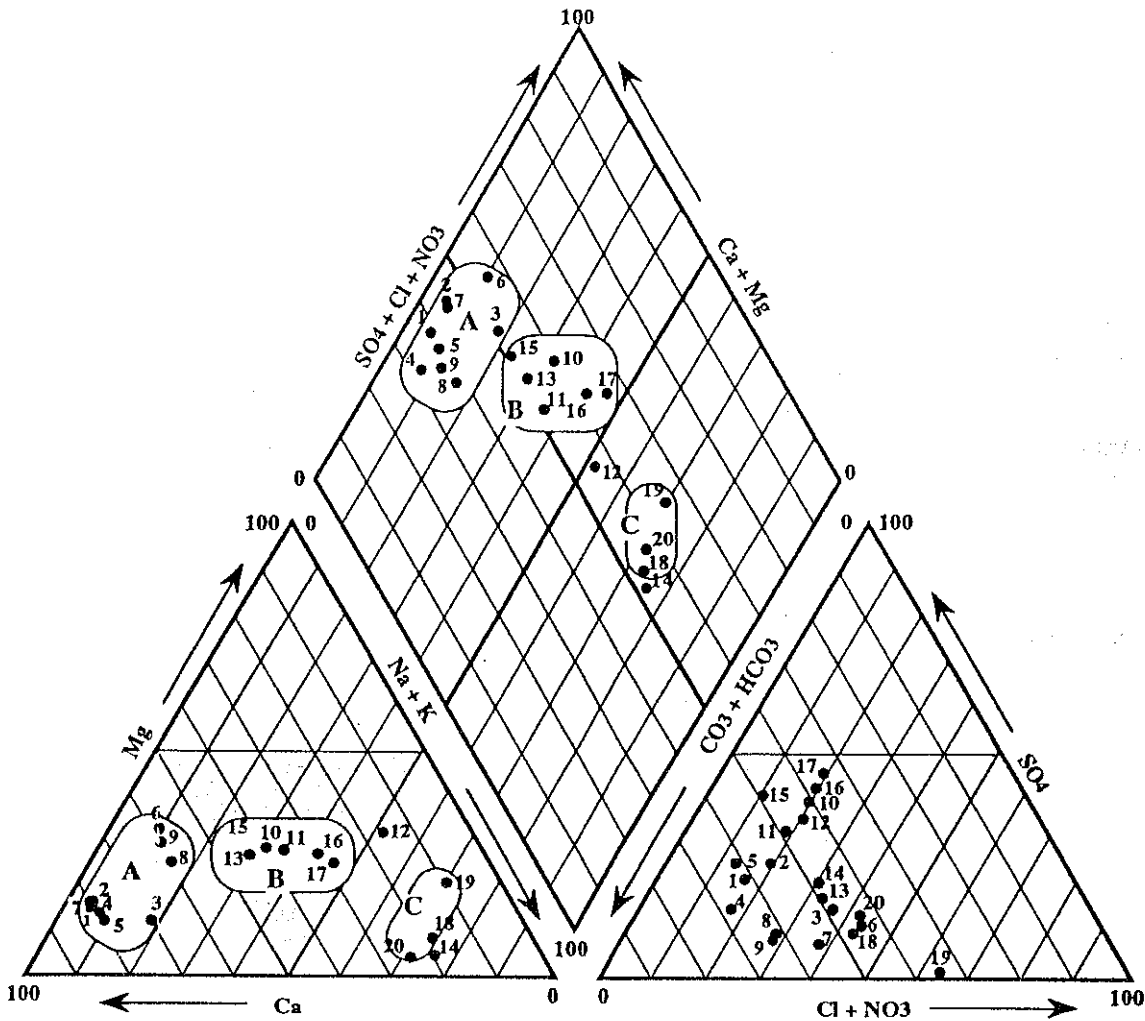


Fig. 2 Evolution des faciès chimique des eaux souterraines dans le plateau d'Oulmès pour la période 1995/1996 (diagramme de Piper).

inférieur à 0.3 pour les eaux de la famille A, compris entre 0.6 et 1.6 pour la famille B et supérieur à 2.5 pour la famille C. Le rapport calcium/magnésium est compris entre 1 et 0.5 pour les eaux de la famille B et supérieur à 2 pour le reste.

Comportement des eaux dans le triangle des anions

Sur le triangle des anions, la distinction entre les trois familles n'est pas aussi nette que sur le triangle des cations; on observe cependant que 70% des puits de la famille A sont relativement plus riches en bicarbonate, le reste des puits étudiés se trouve dans le faciès mixte (à l'exception du puits 19 qui est chloruré).

Pour trouver la cause de cette distribution, nous avons examiné de près les puits dont nous avons jugé, *a priori*, qu'ils avaient un comportement anionique anormal. La plupart de ces puits présentent des teneurs anormales en nitrates par rapport au reste des puits du plateau; elles dépassent 20% de la charge anionique totale. Certains de ces puits ont des teneurs dépassant 50 mg l⁻¹. Ces anomalies sont

observées es nitrates ont enrichissant

En ram 8.2 mg l⁻¹), déplacés ver est aussi net trouvent tou

De ce fa vers C est le

HCO₃ >

Notons que l

Le rappo C; il est sup rapport bica des eaux du

Comportem

D'après la suivants:

- On assie chlorure: En allar cependar des catio
- Le passa eaux sou

Là aussi l'aide des r bicarbonate.

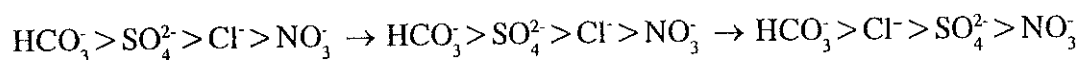
A du reste d le reste; le se eaux; il est i

La comp carte géolog formations li situés dans l regroupe ce regroupe ce son arène gr d'étude en qu eaux souterr chaque dom

observées essentiellement dans les puits des arboriculteurs, ce qui confirme que les nitrates ont une origine essentiellement diffuse due aux apports de fertilisants, enrichissant les eaux souterraines par lessivage des sols agricoles.

En ramenant les teneurs anormales en nitrates à leur valeur médiane (soit 8.2 mg l⁻¹), tous les puits de la famille A se trouvant dans le faciès mixte se sont déplacés vers le faciès bicarbonaté, et la distinction entre la famille A et la famille B est aussi nette que dans le triangle des cations. Pour les puits de la famille C, ils se trouvent tous dans le faciès mixte.

De ce fait, l'itinéraire anionique, en excluant NO₃⁻, et en allant des familles A vers C est le suivant:



Notons que la famille A possède quelques individus ayant un faciès de type C.

Le rapport bicarbonate/chlorure diminue en allant des eaux de la famille A vers C; il est supérieur à 2.5 pour A et en devient inférieur pour le reste des eaux; le rapport bicarbonate/sulfate permet de différencier les eaux de la famille B du reste des eaux du plateau; il est inférieur à 2.5 pour B et en est supérieur pour le reste.

Comportement des eaux dans le losange

D'après la disposition des familles dans le losange de Piper, on note les faits suivants:

- On assiste à une augmentation relative et globale des charges en alcalin, chlorures et sulfates en allant des eaux de la famille A à celles de la famille B. En allant dans le sens contraire, les eaux s'enrichissent en bicarbonates; cependant l'enrichissement en éléments alcalino-terreux constaté dans le triangle des cations est masqué.

- Le passage de la famille B à la famille C est marqué par un enrichissement des eaux souterraines en éléments alcalins et une chute des éléments alcalino-terreux.

Là aussi, la distinction entre les eaux des différentes familles peut se faire à l'aide des rapports caractéristiques suivants: alcalin/chlorure et alcalino-terreux/bicarbonate. En effet, le premier rapport permet de différencier les eaux de la famille A du reste des eaux du plateau; il est inférieur à 1.2 pour A et en est supérieur pour le reste; le second rapport permet de différencier les eaux de la famille C du reste des eaux; il est inférieur à l'unité pour C et en est supérieur pour le reste.

La comparaison de la distribution géographique de ces familles d'eaux avec la carte géologique d'Oulmès fait apparaître une coïncidence avec les différentes formations lithologiques du plateau (Fig. 1). Ainsi, la famille A regroupe les puits situés dans les schistes du Dévonien inférieur et dans les quartzites; la famille B regroupe ceux des schistes ordoviciens et cambro-ordoviciens et la famille C regroupe ceux des schistes de l'auréole métamorphique du granite d'Oulmès et de son arène granitique. En fonction de cette répartition, nous avons subdivisé l'aire d'étude en quatre domaines. Afin de préciser les relations existant entre la qualité des eaux souterraines et la nature lithologique de "l'aquifère", nous avons étudié, dans chaque domaine, le comportement de certains paramètres physico-chimiques des

eaux et comparé la chimie des eaux à celle des roches à l'aide des rapports caractéristiques.

EVOLUTION SPATIALE DE LA QUALITE DES EAUX

Nous avons porté dans le Tableau 1, la composition physico-chimique moyenne des eaux souterraines dans chaque domaine et dans le Tableau 2, nous avons donné la composition chimique moyenne de quelques roches du plateau d'Oulmès.

Tableau 2 Caractéristiques chimiques moyennes de quelques roches du plateau d'Oulmès d'après Termier *et al.* (1950).

	Quartzite	Moyenne des schistes	Moyenne des granite
CaO%	1.43	0.80	1.23
MgO%	1.38	1.32	0.65
K ₂ O%	0.21	2.26	4.33
Na ₂ O%	-	1.30	2.98
Mg/Ca	0.97	1.64	0.53
Na/K	-	0.57	0.69
(Na+K)/Ca	0.15	4.42	5.94

Caractéristiques des eaux souterraines dans chaque domaine

Les eaux du domaine I Le domaine I est situé à l'extrême nord-est de l'aire d'étude; il correspond aux schistes à lentilles de grès et de calcaire du Dévonien inférieur. Tous les puits étudiés du domaine appartiennent à la famille A avec une dominance des sulfates sur les chlorures. La minéralisation est relativement très importante: la conductivité moyenne et le résidu sec moyen sont les plus élevés du plateau. La dureté est aussi importante et le pH est à peu près constant et en moyenne de 7.2. A l'inverse du reste des eaux, les eaux souterraines du domaine I ont des rapports magnésium/calcium et alcalin/calcium inférieurs à l'unité.

Les eaux du domaine II Le domaine II est le domaine des quartzites par excellence. Là aussi, tous les puits étudiés appartiennent à la famille A. Comparées au domaine précédent, les eaux souterraines des quartzites ont une abondance anionique caractérisée par une dominance des chlorures sur les sulfates, une salinité moyenne beaucoup plus faible (la conductivité et le résidu sec sont deux fois plus faibles), une dureté trois fois plus faible et un pH acide. Comme pour les roches quartzitiques du plateau, les rapports magnésium/calcium et alcalin/calcium des eaux sont inférieurs à l'unité.

Les eaux du domaine III Le domaine III est situé dans la partie centrale de l'aire d'étude. Il est formé essentiellement des schistes de l'ordovicien et du cambro-ordovicien. La majorité des puits du domaine appartiennent à la famille B, à l'exception des puits P12 et P14. Comparées au domaine précédent, les eaux souterraines de ce domaine ont un pH aussi acide et une dureté légèrement plus élevée; mais la salinité des eaux est beaucoup plus élevée (la conductivité et le résidu

sec sont deux fois plus élevés) et la concentration des éléments chimiques est différente: on note une augmentation brusque des charges en ions sulfate et sodium; elles sont huit fois plus élevées. A l'inverse des roches schisteuses du plateau, le rapport magnésium/calcium des eaux souterraines est inférieur à l'unité; par contre, le rapport alcalin/calcium de ces eaux est comparable à celui des schistes.

Les eaux du domaine IV Le domaine IV est situé dans la partie ouest de l'aire d'étude. Il est formé essentiellement par les schistes de l'auréole métamorphique et une partie de l'arène granitique. Tous les puits étudiés du domaine appartiennent à la famille C. La minéralisation des eaux est très faible: les valeurs moyennes de la conductivité et du résidu sec sont les plus basses du plateau. Les teneurs de tous les éléments sont très faibles; le pH est relativement très bas (en moyenne de 5.9) et la dureté est voisine de l'unité. Tous les rapports caractéristiques étudiés des eaux souterraines sont comparables à ceux des granites du plateau à l'exception du rapport sodium/potassium.

Discussions

A la limite orientale du domaine I, au-dessus des niveaux dévoniens, viennent des calcaires gréseux et conglomératiques du Viséen supérieur donnant des crêtes qui forment une ligne de partage des eaux superficielles. Ainsi, la présence de ces roches métamorphiques (surtout les roches calcaires) dans les terrains cristallophylliens et à leur bordure, influe beaucoup le chimisme des eaux souterraines qui y circulent. En effet, nous avons enregistré dans ce domaine les valeurs les plus élevées en conductivité, résidu sec et minéralisation par suite de la solubilisation facile et rapide des éléments des roches carbonatées. Aussi, par suite de la dissolution, les eaux souterraines acquièrent un caractère bicarbonaté-calcique et voient leur pH et leur degré hydrométrique s'élever (Dadi, 1991).

Les roches quartzitiques du domaine II forment également une ligne de partage des eaux superficielles à l'intérieur de l'aire d'étude. Le mode de circulation relativement rapide des eaux souterraines dans les fissures des quartzites et la mise en solution très difficile des éléments de ces roches peuvent expliquer la faible concentration en éléments dissous des eaux et donc un résidu sec et une conductivité faible et un pH acide. Les bicarbonates et les éléments alcalino-terreux prédominent par suite de la rareté des alcalins, des chlorures et des sulfates dans ces roches.

Lors du passage au domaine III, la surface de contact eau/roche devient plus grande et la circulation des eaux souterraines devient plus lente dans les roches schisteuses. La concentration en éléments dissous des eaux s'élève; le résidu sec et la conductivité augmentent. La présence d'excès de CO_2 dans les eaux, non contrebalancée par des bases, est à l'origine d'une acidité élevée.

La présence de la pyrite dans les domaines I et III est l'un des principaux responsables de la teneur élevée en sulfates des eaux souterraines et leur prédominance sur les chlorures. Elle est aussi responsable de l'acidité élevée des eaux souterraines de certains puits du domaine II (P12 et P14), suite à la présence très probable de SO_4H_2 ; par contre, cette acidité se trouve neutralisée dans le domaine I (présence des roches calcaires).

Malgré la circulation globalement est-ouest des eaux superficielles dans l'aire d'étude, les eaux du domaine IV sembleraient n'avoir aucune relation avec les eaux

du domaine III: elles sont plus influencées par les roches dans lesquelles elles s'infiltrent. En effet, comme les phénomènes d'attaque des roches cristallines sont lents et que leur mise en solution est extrêmement difficile, les eaux souterraines sont très peu chargées en sels; leur conductivité, et leurs résidus secs sont très faibles.

CONCLUSION

L'analyse des fluctuations spatiales des quelques paramètres physico-chimiques que nous avons pu mesurer, a apporté une contribution importante à l'étude du comportement hydrochimique des eaux souterraines dans le plateau d'Oulmès. Cette analyse a montré en particulier, que la composition chimique des eaux souterraines du plateau est régie principalement par les trois facteurs suivants:

Facteur lithologique Le regroupement des eaux en familles est dû principalement à la diversité lithologique du plateau, et qui détermine ainsi la "physionomie" propre de chaque eau souterraine traversant l'une ou l'autre des formations lithologiques. C'est en fonction de ces données que nous avons subdivisé l'aire d'étude en quatre domaines et nous avons étudié dans chaque domaine la qualité des eaux souterraines et leurs interactions avec la lithologie.

Facteur structural Comme le plateau d'Oulmès est formé d'un complexe de roches cristallines, cristallophylliennes et quartzitiques, la circulation des eaux souterraines se fait le long des zones de circulation privilégiées (qui sont essentiellement les fissures), plus encore suivant des directions privilégiées et rarement d'une manière active dans toute la masse du terrain "aquifère". Ces directions permettent une individualisation des filets liquides, s'opposent à leur mélange et empêchent donc la masse liquide d'avoir une composition chimique homogène. Cela réduit l'effet de la concentration par dissolution sur la composition chimique des eaux souterraines. De ce fait, on n'a pas observé d'accroissement sensible de la minéralisation de l'amont vers l'aval de "l'aquifère".

Facteur anthropique les concentrations des nitrates montrent un certain nombre de pics dépassant les normes de potabilité; ces pics sont observés dans les puits des arboriculteurs. Ce qui explique que les nitrates ont une origine essentiellement diffuse due aux apports des fertilisants.

REFERENCES

- Boutaleb, M. (1988) Reconstitution de l'évolution tectono-métamorphique, magmatique et hydrothermale du district stannio-wolframifère d'Oulmès (Maroc central). Implications métallogéniques. Thèse Doc. d'Etat, INPL, Nancy.
- Dadi, S. (1991) Qualité des eaux de la Moselle à la prise d'eau du district de l'agglomération nancéienne. Thèse Doc. de l'INPL, INPL, Nancy.
- Laziri, F., Dadi, S. & Boutaleb, M. (1996) Présentation du logiciel "OTPIPER" pour la représentation graphique des données de la qualité des eaux. In: *13e Colloque des bassins sédimentaires marocains* (Marrakech, mars 1996), 129-130.
- Piper, A-M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Am. Geophys. Un., Papers, Hydrology*, 914-929.
- Tahiri, A. (1991) Le Maroc central septentrional: Stratigraphie, sédimentologie et tectonique du paléozoïque; un exemple de passage des zones internes aux zones externes de la chaîne hercynienne du Maroc. Thèse Doc. d'Etat, Brest.