

# Essai de bilan hydrochimique sur les eaux du Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (Moyen Atlas, Maroc)

**N. KHALIL  
S. ER ROUANE**

Université Cadi Ayyad  
Faculté des sciences  
Semlalia, Laboratoire  
de géologie appliquée  
BP 2390  
Marrakech 40000, Maroc

**J. MANIA**

Université des sciences  
et technologies de Lille  
EUDIL, LML URA  
CNRS 1441, France

**J. MUDRY**

Université  
de Franche-Comté  
EA 2642 DET Besançon  
France

## Résumé

L'article illustre un nouveau cas d'application d'une méthodologie d'estimation de la composition géochimique et hydrologique à partir de données de terrain d'un secteur karstique. L'objectif de ce travail est d'essayer dans un premier temps : 1) d'évaluer le phénomène de la salinité dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia ; 2) d'étudier la répartition de cette salinité exprimée en termes de conductivité électrique ; 3) de localiser les secteurs géologiques d'apports de sels et dans un deuxième temps d'évaluer les zones géographiques les plus touchées afin de déterminer les secteurs aquifères qui pourraient être utilisés pour fournir en eau potable la population ainsi que les eaux d'irrigation pour l'activité agricole.

Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines et de surface ainsi que les différentes cartes de distribution spatiale de la conductivité électrique, des chlorures et du rapport Sr/Ca attestent du rôle joué par les niveaux lithologiques du Trias (argiles salifères) dans la contamination et la dégradation de la qualité des eaux. Le bilan hydrologique permet d'identifier un débit de perte de  $1,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en période d'étiage exceptionnel (août 1998) qui correspond à 20 % des débits globaux sur une distance de 70 km.

Le bilan géochimique basé sur la concentration des chlorures des eaux superficielles des oueds de l'Oum Er Rbia indique un flux de perte massique de  $41,22 \text{ eq} \cdot \text{m}^{-3}$  qui correspond à une perte d'environ  $2,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  de chlorures sur une distance de 70 km, soit  $0,037 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

*Mots-clés* : aquifère, karst, Lias, Trias, hydrochimie, Oum Er Rbia, Moyen Atlas, Maroc.

## Hydrochemical balance assessment in the High Basin of the Oum Er Rbia river (Middle-Atlas, Morocco)

## Abstract

The aim of this work is, firstly, to try: 1) to evaluate the water salinization in the High Basin of Oum Er Rbia River (Morocco); 2) to study the spatial distribution of this salinization expressed in term of electric conductivity; 3) to locate the zones where salt is provided. Secondly, the geographical zones most affected by salinization are assessed in order to determine the sectors where aquifers could be used for water supply or for agriculture.

The physicochemical analyses of the ground and surface waters and the maps of the spatial distributions of electric conductivity, chlorides and Sr/Ca ratio show the role of Trias strata (salutiferous clays) in the contamination and the degradation of the water quality.

The hydrologic balance enables to identify a  $1,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  seepage loss in exceptional low water season (August 1998) which corresponds to 20 % of the total flow on a 70 km distance.

The geochemical balance is evaluated by using the chloride concentrations of superficial waters of the Oum Er Rbia river's tributaries wadis. It corresponds to a loss of  $41,22 \text{ eq} \cdot \text{m}^{-3}$  which corresponds to a loss of chloride of  $2,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  along a 70 km distance, giving a value of  $0,037 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

*Key words* : aquifer, karst, Trias, hydrochemistry, Middle-Atlas, Morocco.

## Introduction

La contamination des eaux douces par des eaux salées est souvent le fait d'intrusion d'aquifères côtiers par les eaux marines, comme le montrent El Achheb *et al.* (2001), Kifane *et al.* (2001). Dans l'exemple qui est présenté une salinisation très forte des eaux souterraines et superficielles s'explique par le mélange, d'eaux douces provenant d'un massif calcaire et d'eaux salées provenant de sources drainant des eaux lessivées des formations évaporitiques triasiques. Peu d'exemples sont cités dans la littérature mettant en relation des eaux salées souterraines avec des eaux de surface. On cite l'exemple de la contamination des eaux douces d'un lac en Floride (Dooris et Martin, 1979) par apport d'eaux salées pompées dans des calcaires profonds. Un autre exemple cité par Boutaleb *et al.* (2000) montre le lessivage des formations triasiques salées du bassin de l'oued Issen appartenant au massif du Haut Atlas.

Les formations évaporitiques sulfatées se rencontrent au Maroc dans de nombreux niveaux stratigraphiques (Salvan, 1984), à l'exception du Trias où elles atteignent le stade de dépôts chlorurés (sodiques, potassiques et même magnésiens). L'influence des couches salifères sur la salinité des eaux est très importante, une très forte proportion des eaux marocaine est salée (2 milliards de m<sup>3</sup>/an d'après Dinia *et al.*, 1980, in Hakim, 1982).

Cette salinité réduit considérablement la marge utile des ressources en eaux souterraines, elle met hors d'usage une proportion non négligeable des eaux marocaine du fait des teneurs élevées en chlorure et sulfate.

## Présentation du secteur d'étude (Fig. 1)

L'Oum Er Rbia prend naissance dans le Moyen Atlas à une trentaine de kilomètres au NE de la ville de Khénifra où une dizaine de sources constituent son origine hydrologique. Sur son cours supérieur, les massifs montagneux reçoivent des précipitations relativement abondantes. Par ailleurs, l'Oum Er Rbia se distingue dans cette région par un profil en long irrégulier et des pentes fortes. Enrichi par les eaux de ces sources dont une partie est salée (Loup, 1960), l'Oum Er Rbia est caractérisé par des débits assez constants au cours de l'année, les débits d'étiage n'étant jamais inférieurs à 7 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. En aval de Khénifra, il reçoit en rive gauche ses premiers affluents, les oueds Srou et Ououmana.

Le Moyen Atlas, par son altitude, sa situation géographique et son exposition aux influences océaniques, se caractérise par un climat humide et froid, classé comme climat méditerranéen de montagne (Martin, 1981). La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 600 et 1 000 mm, avec des variations importantes en fonction de l'altitude. La zone la plus arrosée est celle du plateau d'Ajdir (1 000 à 1 200 mm/an). Les mois les plus pluvieux sont ceux de janvier et février. Une partie importante de ces précipitations parvient au sol sous forme de neige. Cette dernière tombe essentiellement durant les mois de décembre, janvier et février.

Les températures sont relativement plus basses et connaissent de très importantes variations saisonnières. La température moyenne annuelle sur l'ensemble des causses moyens atlasiques est de 12 °C (Kabbaj et Combe, 1977). L'évaporation est importante sur l'ensemble du bassin, ainsi elle est estimée en moyenne par la méthode annuelle de Turc à 510 mm/an (Bentayeb et Leclerc, 1977). Sa valeur varie fortement avec l'altitude.

Les unités topographiques et surtout leur structure géologique permettent, en reprenant les précisions de Colo (1961) et la mise au point de Martin (1981) de subdiviser le Moyen Atlas en deux grandes parties :

1) le Moyen Atlas méridional ou Atlas de Béni Mellal ;

2) le Moyen Atlas septentrional qui comprend :  
– au NW, le Moyen Atlas tabulaire ou Causse moyen atlasique,  
– au SE, le Moyen Atlas plissé.

Du point de vue géomorphologique, les roches en affleurement sont surtout les calcaires et les dolomies du Lias au sein desquels se développent des manifestations karstiques superficielles et souterraines. Le karst de surface est représenté par des lapiez, des poïjes et des dolines.

## Aperçu géologique et structural

Le bassin versant du haut Oum Er Rbia fait partie du Moyen Atlas. La puissante série stratigraphique du bassin étudié est composée à sa base par un socle paléozoïque sur lequel repose, en discordance, une couverture sédimentaire allant du Trias supérieur jusqu'au Quaternaire (Fig. 2).

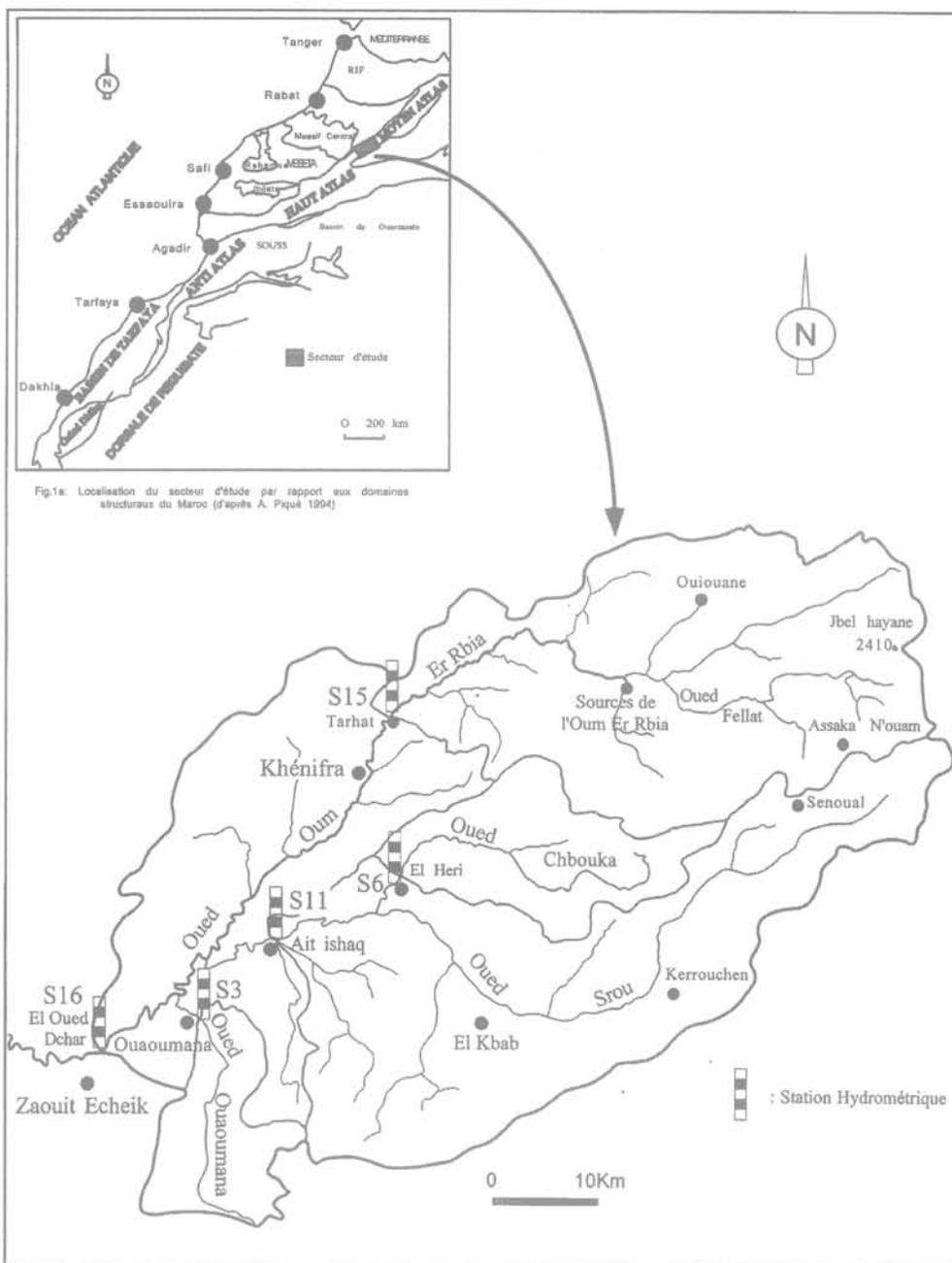
Les formations carbonatées (calcaires et dolomies) du Lias inférieur et moyen forment l'ossature du Causse moyen atlasique. Les dépôts les plus récents (Crétacé moyen et supérieur) affleurent localement dans la vaste cuvette synclinale de Bekrit. Enfin, des dépôts tertiaires et quaternaires et des alluvions récentes sont localisés dans des structures en cuvettes.

Le Trias qui forme le substratum imperméable et continu de l'aquifère liasique semble être à l'origine de la salinité d'une grande partie des eaux marocaines. Les basaltes sommitaux jouent un rôle primordial en formant un écran imperméable empêchant ainsi tout contact entre les formations salifères et les eaux de l'aquifère liasique.

Le Trias affleure sur les bordures du causse moyen atlasique, le long de structures tectoniques cassantes affectant les dépôts liasiques. En général, la plupart des accidents cassants affectant le Lias sont jalonnés par des écaïles de Trias. On le trouve, par ailleurs, au sein des grandes vallées (Srou, Chbouka...).

Le Trias qui repose en discordance sur le Paléozoïque est formé par :

– des argiles ocre rouge, qui sont généralement en contact direct avec le socle et renfermant plusieurs lentilles de gypse et de sel. Néanmoins, dans la vallée de l'oued Srou, ces argiles reposent sur un ensemble grésoconglomératique marquant la base des épandages terriènes du Trias marocain (Fig. 3). La formation argileuse et salifère montre des épaisseurs importantes (plus de 800 m) au centre du bassin à l'Est d'El Kbab. Vers les



**FIG. 1a** Localisation du secteur d'étude par rapport aux domaines structuraux du Maroc (A. Piqué, 1994).  
 Location of the sector of survey in relation with the structural domains of Morocco (A. Piqué, 1994).

**FIG. 1b** Bassin versant du Haut Oum Er Rbia.  
 Upper Oum Er Rbia watershed.

bordures, cette épaisseur n'est que d'environ 300 à 400 mètres (Charroud *et al.*, 1996). Le gypse affleure rarement alors que les lentilles de sel individualisées sur quelques mètres d'épaisseur sont rencontrées dans les forages, ou même peuvent apparaître en surface, de telle sorte que le sel y est souvent exploité soit en salines, soit en galeries quand il se trouve en bancs massifs, et vendu à l'état brut dans les souks de la région;

- des coulées de basaltes doléritiques plus ou moins altérés, de couleur brune à verdâtre qui peuvent atteindre 100 m d'épaisseur dans la corniche de l'oued Srou;
- un ensemble à dominance argileuse et localement gréseux de couleur rouge.

La série sédimentaire jurassique débute par une alternance de dolomies et d'argiles rouges qui marque le passage d'une sédimentation à dominance continentale du Trias supérieur à une sédimentation marine qui s'affirme au Lias par des dépôts carbonatés.

Les dépôts du Lias inférieur sont représentés par une puissante formation calcaro-dolomitique. Ces dépôts sont pratiquement concordants sur ceux du Trias supérieur (Fig. 3).

Les formations carbonatées calcaires et dolomies du Lias inférieur dont l'épaisseur peut dépasser 300 m constituent l'aquifère principal du secteur étudié.

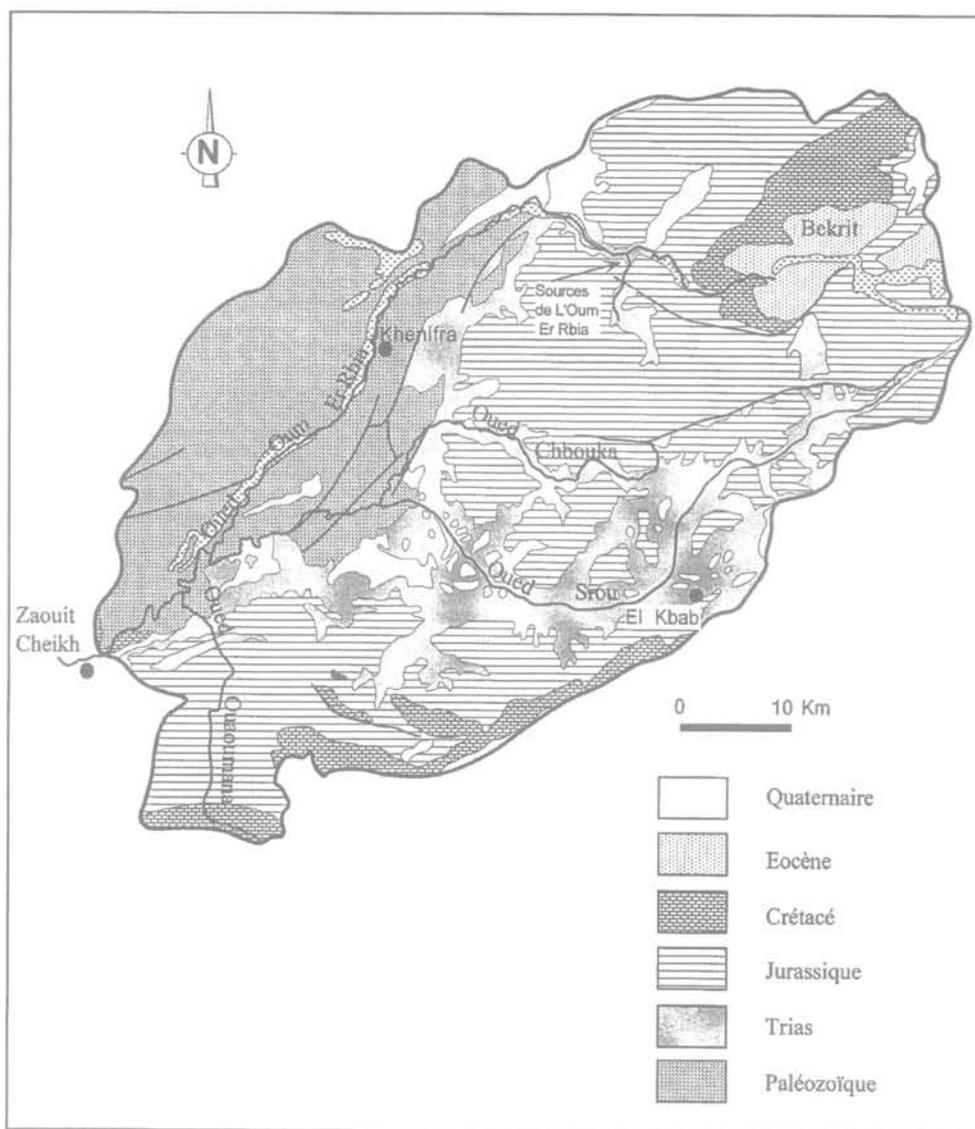


FIG. 2 Carte géologique du haut bassin de l'Oum Er Rbia d'après la carte de Rabat 1/50 000.  
Geological map of the Upper Basin of the Oum Er Rbia according to the map of Rabat 1/50,000.

## 2.2

### Cadre hydrogéologique

Sur le plan hydrogéologique, deux niveaux semblent les plus importants régionalement :

- les calcaires liasiques perméables et karstifiées, constituant l'aquifère principal, qui donnent naissance à de nombreuses sources dont les plus importantes sont celles de l'Oum Er Rbia ;
- les formations du Trias essentiellement argileuses et salifères, jouent un rôle primordial. D'une part, le Trias constitue un niveau de base imperméable et continu pour l'aquifère liasique, d'autre part, il est responsable de la salinité des eaux.

## 3

### Origine de la salinité

L'abondance des niveaux salifères sur l'ensemble de l'échelle stratigraphique du Maroc, est l'une des principales causes directes de la salinité des eaux.

Au niveau du haut bassin de l'Oum Er Rbia, le Trias est la principale source de salinité des eaux. Le Trias qui constitue un ensemble tendre et imperméable joue un rôle primordial dans l'hydrogéologie de la région.

La succession de la trilogie triasique, grès, argiles et basaltes est parfois incomplète. Lorsque les basaltes sont absents, les calcaires liasiques reposent directement sur les argiles salifères ce qui induit une forte salinité des eaux des aquifères sus-jacents (Fig. 4).

L'Oum Er Rbia, fleuve le plus important du Maroc transporte des eaux salées sur une grande longueur et pendant plusieurs mois par an, la cause principale est l'apport d'un certain nombre de sources salées sur une bonne partie de son cours supérieur, s'ajoutent ensuite les apports de l'oued Srou, principal affluent du Haut Oum Er Rbia qui draine un bassin versant où prédominent les affleurements des terrains triasiques.

## 4

### Méthodologie

L'étude est basée sur des campagnes de prélèvement d'échantillons et de jaugeages qui ont été réali-

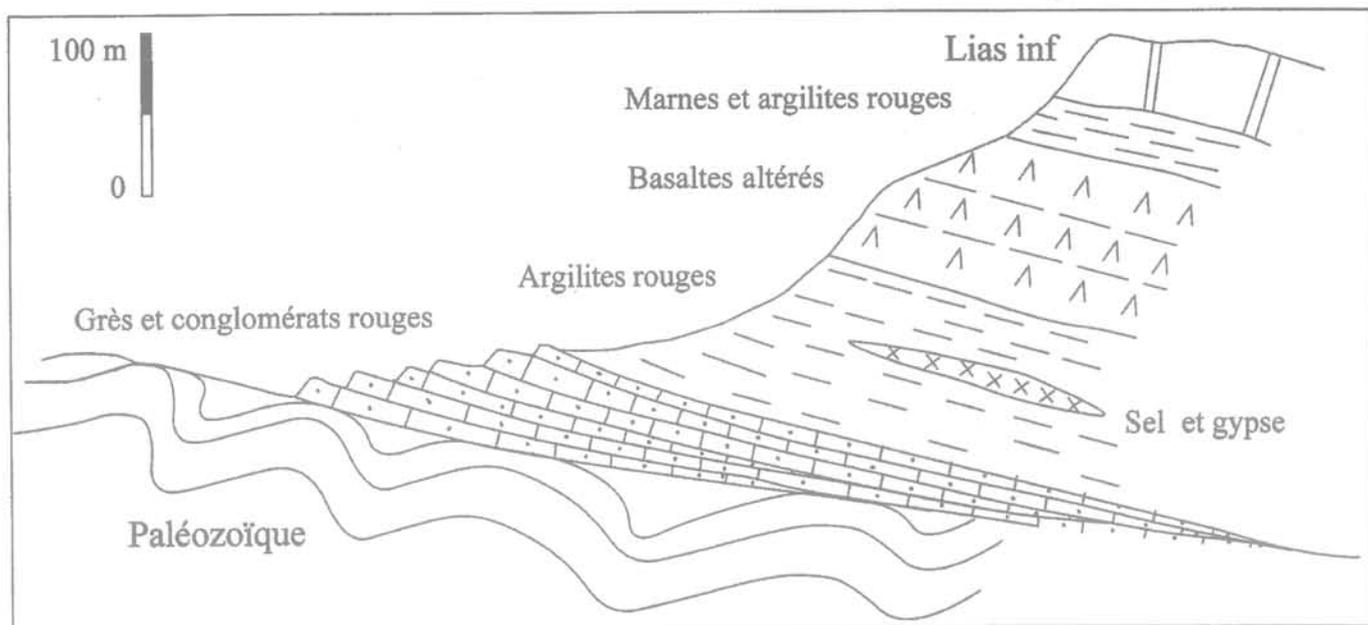


FIG. 3. Faciès complet du Trias (secteur de l'oued Srou, d'après Martin, 1981).  
Lithological triassic deposit of oued Srou area (in Martin, 1981).

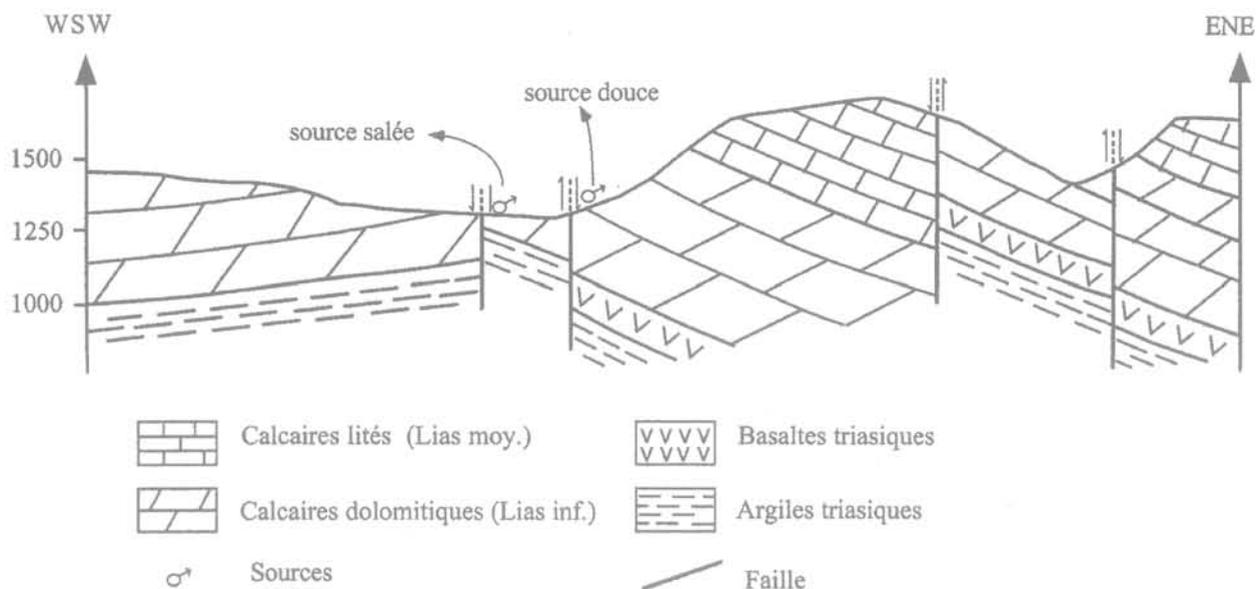


FIG. 4. Coupe géologique au niveau des sources de l'Oum Er Rbia.  
Geological cross section of Oum Er Rbia spring area.

sées en avril 1997 et en août 1998. Ces campagnes ont porté sur les principales sources (environ trente) de la région ainsi que sur les principaux affluents de l'Oum Er Rbia (Tableaux I et II).

La méthodologie employée est basée essentiellement sur l'identification de certains traceurs chimique ( $Sr^{++}/Ca^{++}$ ...) et la réalisation de cartes de répartition des éléments majeurs ( $HCO_3$ ,  $Cl$ ...). Ceci a déjà montré des résultats satisfaisants dans des contextes similaires (Bouchaou *et al.*, 1995; Hsissou *et al.*, 1996; Khalil et Er

Rouane, 1999; Negrel *et al.*, 1997). Pour cela, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été réalisées. Des mesures de certains paramètres ont été effectuées sur le terrain (conductivité, pH, température), l'analyse des éléments majeurs et traces (Ca, Mg, Na, K, Cl,  $HCO_3$ ,  $SO_4$ ,  $NO_3$ , Sr et F) a été faite à La Direction régionale de l'hydraulique (DRH) de Béni Mellal et à l'université de Franche-Comté.

Afin de quantifier les pertes ou les apports, un essai de bilan hydrochimique sera tenté sur tout le bassin.

**TABLEAU I Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (avril 1997) – Teneur en meq/l.**  
Physical and chemical parameters of the groundwater upper watershed of the High Basin of the Oum Er Rbia (April 1997) – Content in meq.l<sup>-1</sup>.

Nom	Ten °C	pH	Cd µs/cm	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Sr
Lac Ouiouane	10	7,96	310	2,67	2,29	1,3	0,03	3,9	1,4	0,05	0,0011
Itmaknouine	14,5	7,79	346	3,77	2,13	0,28	0,05	3,6	1,75	0,22	0,0009
516/30	13	7,36	21000	9,37	4,4	310	0,19	3,2	272	2,48	0,0379
Oum Er Rbia	14,5	7,46	938	4,82	2,13	6	0,025	4,7	5,9	0,85	0,0055
517/30	12	8,03	17900	9,4	5,08	310	0,004	6,52	289,8	2,28	0,0363
521/30	14	7,42	11000	6,87	3,75	180	0,115	6,96	150	2,5	0,0194
source pont	12	7,27	10760	8,65	6,25	185	0,1	6,5	155	1,77	0,0267
Lac Aguelmame	11	7,84	382	3,67	2,33	0,69	0,015	4,8	0,54	0,18	0,0009
Ajdir	10	7,4	76,6	2,12	0,21	0,08	0,08	1,2	1,1	0,01	0,0002
Assoul	13,5	7,21	515	4,65	3,67	0,27	0,025	6,4	0,9	0,25	0,0014
Arrougou	14,5	7,3	530	3,72	2,29	0,39	0,008	5,4	0,42	0,23	0,0011
Lac Ajdir	9,5	7,41	94,7	2,32	0,33	0,03	0,05	2,3	0,2	0,02	0,0005
Ham. Hassan D	12	7,85	560	3,72	3,04	2,5	0,008	5,02	2,24	0,09	0,0011
Ham. Hassan S	11	6,97	14780	61,8	4,17	225	0,08	4,8	212	22,48	0,0402
Jnane Imes 1	13	7,57	612	4,3	3,33	2	0,008	6,3	2,1	0,26	0,0016
Jnane Imes 2	13	7,6	540	4,15	3,29	1,8	0,008	6,2	1,9	0,18	0,0014
Ait Chart	17	7,38	768	4,87	4,04	2	0,013	6,66	2	0,99	0,0023
Ibn Khilil	19	7,23	1923	7,25	9,17	12	0,06	7,2	14,54	2,09	0,0201
Bou Slima	18	7,21	616	4,67	3,87	0,57	0,01	6,92	0,6	0,43	0,0025
Ouarnfaa	18	7,23	541	5,15	2,37	0,56	0,015	6,3	0,54	0,27	0,0021
Boudillite	17	7,13	576	5,57	2,25	0,53	0,06	6,28	0,6	0,22	0,0018
Igly	19	7,26	547	4,55	3,62	0,6	0,015	6,4	0,64	0,27	0,0025
Tamda 1	15	7,2	410	5,3	0,92	0,17	0,03	5,2	0,7	0,06	0,0011
Tamda 2	15	7,16	402	5,52	0,87	0,12	0,02	5,3	0,14	0,06	0,0011
Boulmattene	18,5	7,4	511	4,37	3,42	0,33	0,02	6,3	0,28	0,22	0,0011
Boutmarsite	19,5	7,4	705	3,8	5,04	0,77	0,01	7,24	0,9	0,37	0,0007
Nougziza	18,5	7,26	656	5,4	3,54	0,69	0,015	6,64	0,9	0,57	0,0030
Tiguimate	20	7,26	594	4,55	2,92	0,67	0,018	6	0,76	0,28	0,0027
Ain Infaghen	18	7,34	560	4,52	3,54	0,49	0,013	6,3	0,62	0,17	0,0014
Ait Abd. Aval	16	7,39	483	4,95	2,58	0,19	0,023	7,6	0,2	0,05	0,0011
Ait Abd. amont	16	7,22	499	4,82	2,71	0,21	0,036	6,5	0,42	0,06	0,0011
Ait Laadi	15,5	7,22	524	4,42	2,67	0,28	0,018	5,8	0,24	0,05	0,0011
Tameskourte	16	7,21	600	4,82	3,54	0,44	0,02	6,7	0,52	0,13	0,0016

**TABLEAU II Paramètres physico-chimiques des eaux de surfaces dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia (août 1998) – Teneur en meq/l.**  
Physical and chemical parameters of the surface waters in the upper watershed Basin of the Oum Er Rbia (August 1998) – Content in meq.l<sup>-1</sup>.

N°	T	Ph	Cd à 20 °C	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Sr	Q m <sup>3</sup> /s
1	19,5	7,63	1,29 ms/s	2,72	3,6	6,7	0,06	5,2	5,76	1,2	0,0034	0,226
2	23,5	7,37	1,37 ms/s	4,48	4,48	6,8	0,12	6,1	6,14	2,26	0,0041	0,107
3	24	7,61	3,18 ms/s	3,44	3,2	28,1	0,06	3,8	25,92	2,3	0,0039	0,959
4	24	7,67	3,31 ms/s	3,36	3,2	29	0,06	3,8	26,5	3,08	0,0034	2,43
5	23,5	7,74	3,48 ms/s	3,68	3,2	28,5	0,06	4	26,88	3,15	0,0039	0,801
7	19,5	7,51	11,4 ms/s	8,32	6,52	109,7	0,43	5,6	105,6	1,6	0,0169	0,495
8	23	7,66	8,04 ms/s	5,28	5,84	80,65	0,32	4,8	76,8	1,17	0,0107	0,386
9	24,5	7,52	11,1 ms/s	7,28	6,96	105,7	0,42	5,4	101,8	1,65	0,0132	0,547
10	28,7	7,66	11,2 ms/s	7,44	8,56	105,4	0,42	4,2	103,7	2,01	0,0157	0,53
11	26	7,87	6,41 ms/s	4,84	5,32	57,71	0,23	4,2	56,64	1,12	0,0094	1,468
12	19	7,78	4,35 ms/s	5,32	2,92	41,17	0,15	3,8	37,44	4,78	0,0105	0,51
13	14,5	7,61	1,96 ms/s	4,08	2,32	14,74	0,08	5,6	13,44	0,97	0,0043	N.J
14	16	7,57	2,61 ms/s	3,32	2,52	22,83	0,1	5,4	20,16	1,27	0,0046	7,764
15	18	7,57	2,66 ms/s	3,24	2,56	24,43	0,1	4,2	22,08	1,14	0,0050	8,576
16	25	8,18	3,17 ms/s	3,36	3,24	29,78	0,12	4,3	26,88	1,95	0,0055	8,401

## Résultats

### 5.1

#### Répartition des écoulements de surface

Les écoulements superficiels de l'Oum Er Rbia et ses affluents sont connus et contrôlés au niveau des cinq stations principales. Ces écoulements sont définis à partir de l'analyse statistique des chroniques des débits moyens journaliers. La période commune des observations pour les eaux de surface est de 252 mois entre septembre 1975 et août 1996.

L'analyse statistique des données hydrométriques doit permettre de définir les régimes des écoulements à partir des valeurs caractéristiques.

La position des points de mesures ainsi que les résultats de cette campagne sont reportés sur la figure 5 ou les débits sont exprimés en  $m^3.s^{-1}$ .

Le tableau III montre que pour toutes les stations, les débits augmentent à partir de septembre et présentent un maximum au mois de février, puis ils diminuent régulièrement pour atteindre un minimum au mois d'août. Il n'y a pas de période de basses eaux d'hiver ce qui démontre un caractère montagnard nettement marqué.

Le tableau IV ci dessous donne les principaux paramètres statistiques caractéristiques des débits moyens journaliers au niveau des cinq stations de jaugeages.

Les valeurs des écarts type traduisent une forte dispersion des valeurs de débits moyens journaliers des stations concernées.

**TABEAU III Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans le Haut Bassin de l'Oum Er Rbia.**  
Physical and chemical parameters of the groundwater upper watershed of the High Basin of the Oum Er Rbia.

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy.
Tarhat (S15)	11,61	12,30	13,51	14,55	18,65	24,76	23,22	20,92	16,59	14,04	11,93	11,23	16,11
El Heri (S6)	1,16	1,49	1,90	2,44	3,85	4,58	3,51	3,15	2,22	1,51	1,23	1,10	2,35
Ait Ishaq (S11)	2,34	3,72	5,13	6,56	12,53	16,75	12,07	9,72	5,82	3,30	2,40	2,04	6,86
Ouaoumana (S3)	0,40	0,54	0,72	0,78	2,17	3,16	2,42	1,66	0,72	0,48	0,36	0,36	1,15
Dchar El Oued (S16)	11,75	13,94	17,25	20,38	32,54	43,17	33,79	28,62	19,57	14,50	11,59	10,86	21,50

**TABEAU IV Paramètres physico-chimiques des eaux de surface dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia.**  
Physical and chemical parameters of the surface waters in the upper watershed Basin of the Oum Er Rbia.

Station	Tarhat (S15)	El Heri (S6)	Ait Ishaq (S11)	Ouaoumana (S3)	Dchar El Oued (S16)
Maximum	259	66	252	107	691
Minimum	11,6	0,52	0,55	0,07	5,67
Moyenne	16,05	2,33	6,79	1,14	21,37
Écart type	11,16	3,35	13,37	3,03	29,29
C.V	0,7	1,44	1,97	2,66	1,37
Intervalle de Confiance	0,25	0,08	0,30	0,07	0,66
Variance	124,63	11,24	178,8	9,21	858,1

### 5.2

#### Campagne de jaugeage (août 1998)

Dans le but de déterminer les zones d'apports et/ou de pertes, une campagne de jaugeage au moulinet a été réalisée en août 1998. Cette campagne a intéressé le cours principal de l'oued Oum Er Rbia et ses affluents les oueds : Srou, Chbouka et Ouaoumana.

Du fait de l'ampleur du bassin qui avoisine 3 400  $km^2$ , dont l'accès est très difficile, de la difficulté à réaliser des jaugeages au moulinet sur le cours d'eau principal (profondeurs et débits importants), on s'est limité à un nombre réduit de stations de mesures.

L'oued Chbouka : ce cours d'eau prend naissance dans une région riche en eau (lac Miami) à 1 600 m d'altitude. D'après les jaugeages effectués on note :

- entre la station S4 et S5, un apport de  $180 l.s^{-1}$ ;
- entre S5 et S6 une très importante perte de l'ordre de  $300 l.s^{-1}$  sans aucun prélèvement apparent.

Au niveau de l'oued Srou, nous avons pu noter un apport d'écoulement entre les stations S7 et S8. Le débit augmente assez brusquement sans aucun apport latéral apparent. Ce débit excédentaire de  $100 l.s^{-1}$  est apparemment lié à des venues d'eau par le fond du lit de l'oued.

Entre les stations S8 et S9, on a observé une diminution de l'écoulement de l'ordre de  $50 l.s^{-1}$ . Avant la station d'Ait Ishaq, le Srou est rejoint en rive droite par l'oued Chbouka. Cet affluent possède un débit double de celui du cours principal (Srou) alors que son bassin versant topographique est 5 fois plus petit. Le débit au niveau de la station représente la somme des deux cours d'eau (Srou et Chbouka).

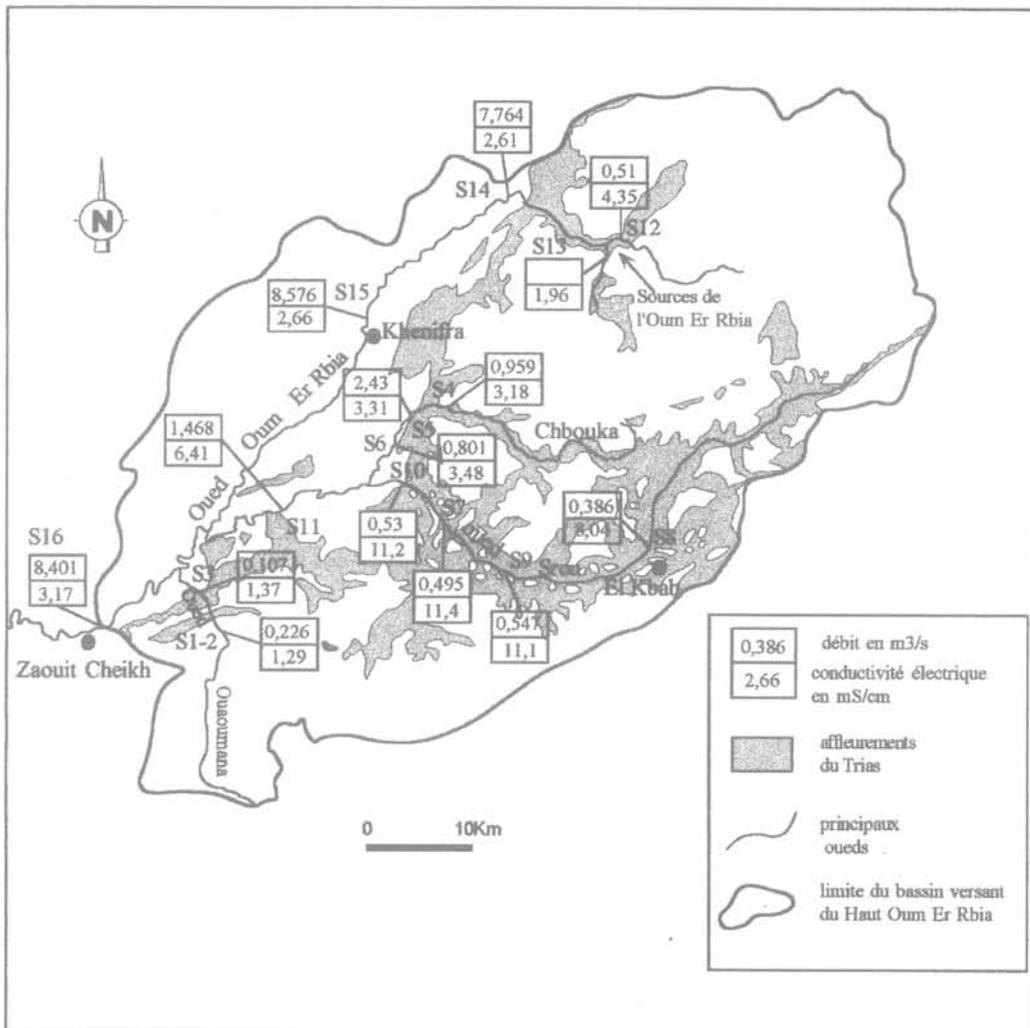


FIG. 5 Carte des conductivités électriques en ms/cm et débits des eaux de surface dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia (août 1998).  
Electric conductivity (ms/cm) and flow map of the surface waters in the High Basin of the Oum Er Rbia (August 1998).

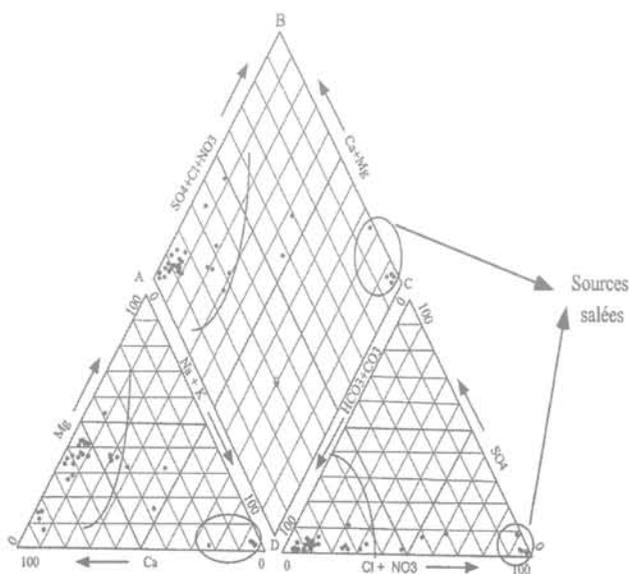


FIG. 6a Diagramme de Piper pour les eaux souterraines (avril 1997).  
Piper Diagrams for groundwater (April 1997).

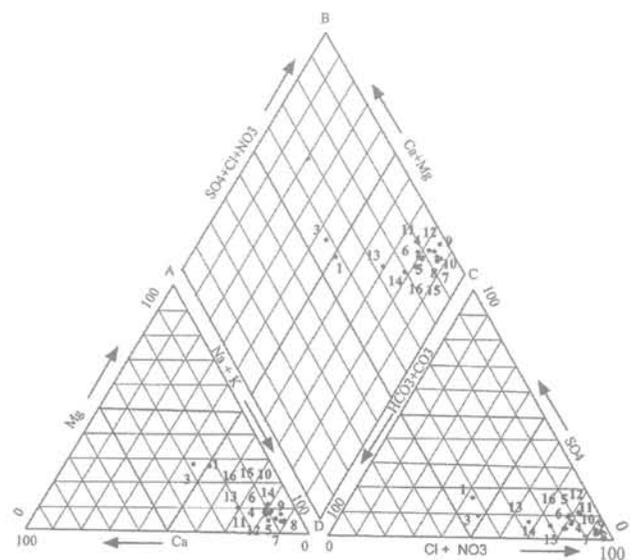


FIG. 6b Diagramme de Piper pour les eaux de surface (août 1998).  
Piper Diagrams for surface waters (August 1998).

Au niveau de l'oued Ououmana on a observé une perte de l'ordre de  $100 \text{ l.s}^{-1}$  entre les stations S1 et S3.

L'oued Oum Er Rbia : le débit mesuré au niveau de la station de prélèvement de l'ONEP (station S14) qui est de  $7,76 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  est dû essentiellement aux apports des sources de l'Oum Er Rbia, le débit de l'oued Fellat atteint  $0,51 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

Les différents sous-bassins, constituant l'impluvium de l'Oum Er Rbia ont des productivités fort différentes et indépendantes de leur surface. L'essentiel du débit de l'oued principal est dû à l'apport important fourni par les sources de l'Oum Er Rbia.

Le cours d'eau principal et ses affluents sont marqués par l'existence de pertes et d'apports par le fond des lits qui entraînent des variations de débits spectaculaires.

Le bilan hydrologique des débits de pertes pour août 1998 peut s'écrire de la façon suivante (Fig. 5) :

$$Q_{\text{pertes}} = (Q \text{ S15} + Q \text{ S11} + Q \text{ S3}) - Q \text{ S16} = 1,75 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} \text{ avec } Q \text{ S16} = 8,401, Q \text{ S15} = 8,576, Q \text{ S11} = 1,468, \text{ et } Q \text{ S3} = 0,107 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$$

soit un peu moins de 20 % du débit total en étiage du bassin de l'Oum Er Rbia ( $8,40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

### 5.3

## Géochimie

#### 5.3.1

### Les eaux souterraines

Les différentes campagnes de prélèvement systématique réalisées dans le Haut Oum Er Rbia ont permis d'obtenir un cliché instantané des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la totalité du bassin.

Sur l'ensemble du bassin, la géochimie des eaux présente une grande variation, avec des eaux peu minéralisées (conductivité électrique inférieure à  $7 \text{ ms.cm}^{-1}$ ) à des eaux très minéralisées (conductivité moyennement supérieure à  $20 \text{ ms.cm}^{-1}$ ).

Le report des analyses chimiques sur le diagramme de Piper (Fig. 6a) montre que les eaux souterraines, ont essentiellement un faciès bicarbonaté-calcique, et sont très peu chargées en chlorure et en sodium. Au contact du Trias, les eaux se chargent en sels (Na et Cl) et acquièrent un faciès chloruré-sodique, ce qui entraîne une dégradation de leur qualité (la conductivité électrique peut atteindre jusqu'à  $26 \text{ ms.cm}^{-1}$ ).

#### 5.3.2

### Les eaux de surface

La carte de la répartition de la conductivité électrique des eaux de surface (Fig. 5), montre que les valeurs fluctuent entre  $1 \text{ ms.cm}^{-1}$  et  $11 \text{ ms.cm}^{-1}$ , ces dernières illustrent la variabilité de la composition chimique des eaux. La carte permet de localiser les zones à eaux douces et les zones à eaux salées qui coïncident avec les aires d'affleurement des argiles salifères triasiques.

L'influence des sources salées sur la qualité de l'Oum Er Rbia est très nette, particulièrement en période d'étiage. L'apport des sources salées, de débit faible, qui au niveau des sources de l'Oum Er Rbia se retrouve sur une bonne partie le long de l'oued, modifie donc la composition chimique en amont des eaux de

l'Oum Er Rbia, qui acquiert après mélange entre sources douces et salées une conductivité moyenne de l'ordre de  $1,2$  à  $1,4 \text{ ms.cm}^{-1}$ .

La salinité est accentuée ensuite par les apports des affluents, essentiellement ceux de l'oued Srou dont la conductivité est de l'ordre de  $10 \text{ ms.cm}^{-1}$ . Ces apports modifient donc considérablement la qualité de l'eau de l'oued, limitant ainsi l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable.

Sur le plan méthodologique, le strontium a été souvent utilisé en hydrogéologie par de nombreux auteurs (Carré, 1975 ; Meybeck, 1984 ; Hsissou *et al.*, 1996 ; Negrel *et al.*, 1997) et le rapport ionique en concentration molaire Sr/Ca est caractéristique d'une origine évaporitique lorsqu'il est supérieur ou égal à 1 %.

L'utilisation du rapport Sr/Ca a permis de distinguer :

- un premier groupe dont le rapport Sr/Ca < 1 %, représente les eaux issues des calcaires liasiques sans aucun rapport avec le Trias salifère ;
- un deuxième groupe avec un rapport Sr/Ca > 1 %, représente les eaux issues des horizons évaporitiques.

La carte de répartition des rapports Sr/Ca, en liaison avec les affleurements du Trias, démontre (Fig. 7) que les eaux qui sont en contact avec les formations triasiques, présentent les plus forts rapports, mais qu'à l'exception de l'oued Ououmana tous les rapports Sr/Ca démontrent la marque des évaporites.

### 5.4

## Bilan hydrochimique

Un bilan des flux en chlorures peut être réalisé à l'échelle du bassin, afin d'essayer de quantifier les pertes ou les apports.

#### 5.4.1

### Répartition des chlorures

La carte de la répartition des teneurs en chlorures (Fig. 7) a permis d'individualiser :

- le long de l'oued Srou, une zone caractérisée par des fortes concentrations qui peuvent atteindre  $100 \text{ meq.l}^{-1}$ , en relation avec la nature lithologique du bassin versant ;
- l'oued Fellat avec des valeurs élevées de  $37 \text{ meq.l}^{-1}$  ;
- les autres zones (oued Ououmana et oued Chbouka) sont marquées par des teneurs de l'ordre de  $20 \text{ meq.l}^{-1}$  ;
- l'oued Ououmana présente les valeurs les plus faibles ( $5,76 \text{ meq.l}^{-1}$ ) ;
- à Dchar El Oued la teneur en chlorure est de  $26,88 \text{ meq.l}^{-1}$ .

#### 5.4.2

### Bilan des chlorures

Pour essayer de quantifier l'impact de la composante évaporitique, on a utilisé les teneurs en chlorures mesurées durant la campagne d'août 1998.

D'après les observations de terrain, le déficit de débit à Dchar El Oued, représente des pertes dans les calcaires de l'aquifère souterrain.

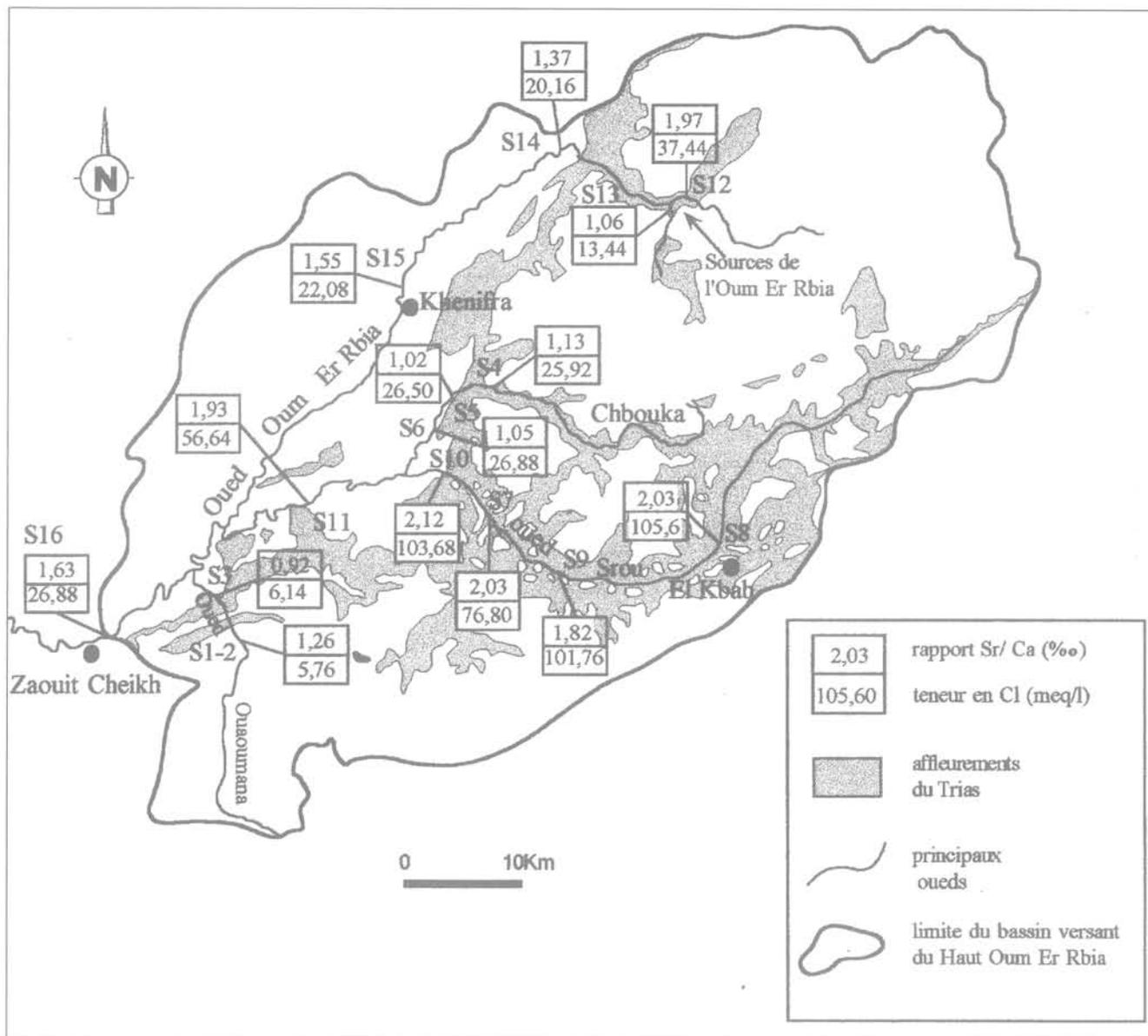


FIG. 7 Carte des rapports Sr/Ca et des teneurs en rCl des eaux de surface dans le haut bassin de l'Oum Er Rbia (août 1998).

Map of the Sr/Ca ratio and chloride contents of surface waters in the Oum Er Rbia Upper watershed (August 1998).

A partir des données des débits du tableau IV, les pertes dans les calcaires sont estimées à  $6,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en période hydrologique d'activité minimale et sont de  $2,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en période moyenne. Cette inversion semble indiquer une réduction des pertes avec une recharge des calcaires qui inhibe le phénomène des pertes. En période de crue l'apport d'eau atteint  $73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

En août 1998, les débits des pertes ont été estimés à  $1,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à la suite de la réalisation de profils de jaugeages. Cette quantité d'eau vient alimenter l'aquifère liasique.

Pour un apport massique minimal de  $273\,417 \text{ tonnes} \cdot \text{an}^{-1}$  (calculé sur la période 1975-1996) au niveau de la station S15 de Tarhat (Tableau IV), les chlorures perdus dans l'aquifère souterrain représentent  $151\,373 \text{ tonnes} \cdot \text{an}^{-1}$ .

En période de moyennes eaux, le déficit de débit atteint  $2,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et le flux en chlorure  $6,09 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  ce qui représente  $192\,054 \text{ tonnes} \cdot \text{an}^{-1}$ .

A partir des données de la carte de la figure 7, on a essayé de quantifier les pertes des flux de chlorures sur la base des chiffres de la campagne d'août 1998.

En période des basses eaux exceptionnelles d'août 1998. La démonstration est la suivante (Figs. 5 et 7):

$$Q_{\text{pertes}} = 1,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{pertes}} \cdot F_{\text{pertes}} &= [F_{S15} \cdot Q_{S15} + F_{S3} \cdot Q_{S3} + F_{S11} \cdot Q_{S11}] - F_{S16} \cdot Q_{S16} \\ &= [22,08 \cdot 8,576 + 6,14 \cdot 0,107 + 56,64 \cdot 1,468] - 26,88 \cdot 8,401 \\ &= 273,163 - 225,819 = 47,344 \text{ eq} \cdot \text{s}^{-1} = \text{Def}_{\text{pertes}} \end{aligned}$$

avec  $\text{Def}_{\text{pertes}}$ : déficit lié aux pertes;

F: la concentration en chlorures exprimée en meq.l<sup>-1</sup> et le débit Q en m<sup>3</sup>/s sur les différentes stations S.

Soit  $F_{\text{pertes}} = \text{Def}_{\text{pertes}} / Q_{\text{pertes}} = 47,344 / 1,75 = 41,22 \text{ eq} \cdot \text{m}^{-3}$ ; soit  $2,56 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  sur une distance de 70 km qui correspond à  $0,037 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$

## Conclusion

Cette étude de l'impact de la composante évaporitique du Trias sur les eaux du Haut Oum Er Rbia a permis de mettre en évidence :

- le rôle des argiles salifères dans la contamination des eaux de l'aquifère liasique ;
- le rôle des basaltes triasiques dans la protection des eaux lorsque ces derniers sont présents.

Les différentes cartes de la répartition géographique de la conductivité électrique et des chlorures montrent que la localisation des secteurs les plus touchés par la salinité est en relation étroite avec les aires d'affleurement des argiles salifères. Ces cartes montrent que la salinité augmente de l'amont vers l'aval. Le sous-bassin le plus salé est celui de l'Oued Srou.

Au niveau de l'exutoire à Dchar El Oued on constate pour tous les éléments chimiques une diminution des concentrations qui est due à l'apport continu d'eau douce

des sources de l'Oum Er Rbia venant des massifs calcaires et surtout le rôle important joué par l'oued Ououmana au niveau de la dilution des eaux de l'Oum Er Rbia.

Le bilan hydrologique permet d'identifier un débit de perte de  $1,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en période d'étiage exceptionnel (août 1998) qui correspond à 20 % des débits globaux sur une distance de 70 km. Cette quantité d'eau alimente l'aquifère liasique.

Le bilan géochimique basé sur la concentration des chlorures des eaux superficielles des oueds de l'Oum Er Rbia indique un flux de perte massique de  $41,22 \text{ eq} \cdot \text{m}^{-3}$  qui correspond à une perte d'environ  $2,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  de chlorures sur une distance de 70 km, soit  $0,037 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### REMERCIEMENTS

Le travail de recherche a bénéficié d'une action intégrée franco-marocaine entre l'université de Marrakech, le DET de Besançon et le LML (URA CNRS 1441) de l'université de Lille-Eudil.

## Bibliographie

- Boutaleb S., Bouchaou L.H., Mudry J., Hsisou Y., Mania J., Chauve P. – Hydrogeologic effects on the quality of water in the oued Issen watershed, western upper mountains, Morocco. *Hydrogeology Journal*, 8, 2000, p. 230-238.
- Bentayeb A., Leclerc C. – Le Moyen Atlas. Le Causse moyen atlasique. In *Ressources en eau du Maroc : domaine atlasique et sud atlasique. Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, n° 231, 1977, p. 37-66.
- Bouchaou L.H. – *Fonctionnement des aquifères atlasiques et leur relation avec les aquifères de la plaine : cas de l'Atlas de Béni Mellal et de la plaine du Tadla (Maroc)*. Thèse de doctorat d'État, 1995.
- Carré J. – *Géochimie du strontium dans les eaux de la nappe et de surface de la région parisienne*. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, université Paris VI, 1975, 216 p.
- Charroud A. et al. – Dynamique sédimentaire des formations triasiques du Moyen Atlas méridional. In F. Medina (éd), *Le Permien et le Trias du Maroc : état des connaissances*. Éditions Pumag, Marrakech, 1996, p. 269-289.
- Colo G. – Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, n° 139, 1961, 226 p., 28 fig., 1 carte.
- Dooris P.M., Martin D. – Groundwater induced Changes in Lake Chemistry. *Groundwater* 17, n° 4, 1974, p. 324-327.
- Hakim B. – *Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens : Liban, Syrie et Maroc*. Thèse d'État de géographie physique, université Aix-Marseille II en 4 vol., 1982, 667 p.
- El Achheb A., Mania J., Mudry J., Chauve P., Bahi L. – Processus de salinisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel-Doukkala (Maroc occidental). First Intern. Conf. SWICA-M3, *Salt Water Intrusion and Coastal Aquifer*, Essaouira, 23-25 avril 2001.
- Hsisou Y., Mania J., Mangin A., Bakalowicz M., Gaiz A. – Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires  $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ . *Jour. of Hydrology*, 183, 1996, p. 445-451.
- Kabbaj A., Combe M. – Présentation du domaine atlasique. In *Ressources en eau du Maroc : domaine atlasique et sud atlasique. Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, n° 231, 1977, p. 29-36.
- Kifane D., El Mandour A., Mania J., Crampon N. – L'effet du développement du périmètre d'irrigation (café Maure-Madagh) sur le comportement hydrodynamique et la qualité hydrochimique de la nappe des Triffa. *Colloque national d'hydrogéologie*, Fès, Maroc, 26-27 avril 2001.
- Khalil N., Er Rouane S. – Influence de la composante évaporitique du Trias sur la qualité des eaux du haut bassin de l'Oum Er Rbia (Maroc). Deuxième Réunion du Groupe du Permien et du Trias, Marrakech, 24-26 novembre 1999.
- Loup J. – *L'Oum Er Rbia. Contribution à l'étude hydrogéologique d'un fleuve marocain*. Institut scientifique chérifien, Service de géographie physique, n° 9, Rabat, Maroc, 1960.
- Martin J. – Le Moyen Atlas central. Étude géomorphologique. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, n° 258 bis, 1981, 446 p.
- Meybeck M. – *Les fleuves et le cycle géochimiques des éléments*. Thèse de doctorat d'État, université Paris VI, 1984, 506 p.
- Négrel P., Fouillac C., Brach M. – A strontium isotopic study of mineral and surface waters from the Cézalier (Massif central, France): Implications for mixing processus in areas of disseminated emergences of mineral water. *Chemical geology* (135), 1997, p. 89-101.
- Piqué A. – Géologie du Maroc: les domaines régionaux et leur évolution structurale. *Histoire géologique du Maroc*, 1994, 284 p.
- Salvan M. – Les formations évaporitiques du Trias marocain. Problèmes stratigraphiques, paléogéographiques et paléoclimatologiques. Quelques réflexions. *Revue de géologie dynamique et de géographie physique*, Paris, vol. 25, fasc. 3, 1984, p. 187-203.