

Chimie des eaux et alimentation du bassin versant du Djajerud (Iran)

Vincent VALLES (1), Massoud GHOLAMI (2), Roger LAMBERT (2)

RÉSUMÉ

Le bassin versant du Djajerud s'étage sur une dénivelée de 3 410 m. Il comporte 3 zones géologiques et climatiques : haute montagne, piémont et plaine de Varamine. Le climat est d'autant plus aride que l'altitude est basse. Deux saisons hydrologiques alternent : la fonte des neiges correspondant aux hautes eaux et la période de sécheresse occasionnant l'étiage.

A partir du concept d'alcalinité résiduelle, trois classes d'eau ont été établies selon leurs caractéristiques chimiques : eaux carbonatées, sulfatées ou bien chlorurées. Deux zonations de ces eaux ont été effectuées, l'une en hautes eaux, l'autre à l'étiage. Elles permettent de préciser le fonctionnement des différents réservoirs alimentant le fleuve.

Ainsi il est possible de distinguer l'apport superficiel ou profond de deux groupes d'affluents de haute montagne, le rôle des nappes et des pluies du piémont, ainsi que la recharge ou bien le drainage des nappes de la plaine de Varamine par le Djajerud.

MOTS-CLÉS : Iran — Bassin versant — Chimie des eaux — Origine des eaux.

ABSTRACT

WATER CHEMISTRY AND RIVER FLOWS IN THE JAJERUD (IRAN) BASIN

The Jajerud basin, with 3 410 m elevation range, includes three climatic and geological zones : the high mountains, the piemont and the Varamin plain. The climate is the more arid as the elevation decreases. The two alternate hydrological seasons are of high flows corresponding to snowmelt and low flows during the drought period.

The concept of residual alkalinity was used for the characterization of three hydrochemical classes : carbonate, sulphate and chloride dominated waters. The zonations determined for these three classes for high flows and low flows allowed the involvement of the various reservoirs in contributing to river flows to be assessed.

Thus, the surface or deep supply from two groups of high mountain tributaries, the role of water tables and rainfalls in the piemont, as well as the recharging or the drainage of the Varamin plain water tables by the Jajerud river, could be distinguished.

KEY WORDS : Iran — Jajerud basin — Water chemistry — Water origin.

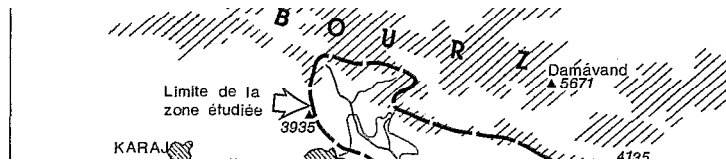
1. INTRODUCTION

Le bassin versant du Djajerud se situe sur le versant sud de l'Elbourz (Iran), à l'est de Téhéran et recouvre une superficie de 2 900 km² (fig. 1). Il s'étale sur une plage d'altitudes étendue, à savoir depuis 4 250 m au nord jusqu'à 840 m au sud. La dénivelée maximale de 3 410 m s'échelonne sur 95 km.

A ce gradient nord-sud d'altitude correspond aussi un gradient climatique. Les hauteurs sont abondamment arrosées et l'évapotranspiration y est réduite. En revanche, au sud, dans les zones marécageuses de la plaine de Varamine, les précipitations sont faibles et l'évapotranspiration importante.

(1) Labo. de Pédologie, Aménagement, ENSAT, 145 av. de Muret, F 31076, Toulouse Cedex.

(2) Institut Géographique Daniel Faucher, Univ. Toulouse Mirail, 5 allée Antonio Machado, F 31058 Toulouse Cedex.



limons et en argiles augmente progressivement. Le confinement des eaux et l'aridité sont à l'origine de formations évaporitiques actuelles dans lesquelles se mêlent gypse, halite et marnes.

2.2. CLIMATOLOGIE ET HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT

Le climat du bassin versant du Djajrud se caractérise par deux saisons. L'une froide, assez humide, dure de novembre à avril. L'autre est plutôt chaude et sèche.

En altitude, c'est-à-dire au nord, le climat est sub-humide froid. En revanche, il se réchauffe lorsque l'on se déplace vers le sud. Il devient alors semi-aride froid en zone de piémont et aride froid dans la plaine de Varamine.

Les précipitations varient aussi. Le nord du bassin versant est le plus arrosé ; il reçoit 800 mm annuellement pour l'essentiel sous forme de neige qui persiste jusqu'en mai.

L'évapotranspiration annuelle est inférieure à 1 500 mm. Au sud la pluviosité est inférieure à 150 mm et l'évapotranspiration est supérieure à 4 000 mm. Dans le piémont et les parties basses, les pluies surviennent au printemps et en automne.

L'hydrologie du Djajrud permet de distinguer les trois zones précédemment citées.

En haute montagne, la fonte des neiges commence en mars. En avril, elle est maximale et souvent associée à des pluies, ce qui provoque des crues. A cette époque, les nappes se rechargent ce qui permet d'alimenter le fleuve durant la période sèche (juin-novembre). Elles finissent alors par s'assécher. Le débit spécifique de la partie haute du bassin versant varie de 750 à 500 mm par an.

Le piémont et la moyenne montagne sont sillonnés par divers affluents du Djajrud. Son alimentation est nivolumineuse en amont mais influencée par les nappes, les barrages et les affluents. A ce niveau, de nombreux prélèvements sont effectués pour l'irrigation de la plaine de Varamine et l'alimentation en eau de Téhéran. Le débit spécifique varie de 340 à 270 mm en amont jusqu'à 140-110 mm, par an en aval. Les débits maxima sont observés en mars-avril du fait de la fonte des neiges et en octobre-novembre à cause des pluies.

Enfin, dans la plaine de Varamine, le Djajrud est sec de juillet à octobre. Les eaux se perdent dans les sédiments du fleuve où elles alimentent les nappes de la plaine. Le débit spécifique est de l'ordre de 40 mm par an.

Pour alléger le traitement des résultats, nous ne retiendrons que certaines stations régulièrement réparties le long du fleuve. Ainsi d'amont vers l'aval, nous avons choisi les localités suivantes : Fasham, Oshan, Roodak, Ali-Abad et Latyan, représentatives de la haute et moyenne montagne, Mamlou et Kaboud-Goonbad caractéristiques du piémont, et Sharif-Abad qui constitue le début de la plaine de Varamine. Au-delà, il convient de recourir aux analyses de la nappe de la plaine de Varamine au voisinage du fleuve car celui-ci est le plus souvent à sec.

2.3. RAPPEL SUR LE CONCEPT D'ALCALINITÉ RÉSIDUELLE GÉNÉRALISÉE

Les eaux du bassin versant du Djajrud se caractérisent par la présence de sodium. Les critères de classification des eaux sodiques sont en général la conductivité électrique (CE) et le SAR (Sodium Adsorption Ratio), avec $SAR = Na / \sqrt{(Ca + Mg) / 2}$ (Na, Ca, Mg en meq/l) (RICHARDS, 1954). Ces paramètres ayant fait preuve de nombreuses limites (VALLÈS et al., 1983, 1988 ; VALLÈS 1988), nous leur préférons le concept d'alcalinité résiduelle généralisée.

L'alcalinité se définit comme « la somme des concentrations des bases faibles multipliées par le nombre de protons que chacune de ces bases peut neutraliser, moins la concentration en protons de la solution » (BOURRIÉ, 1976). Dans la plupart des sols, cette alcalinité est essentiellement constituée par des espèces carbonatées.

Les concepts thermodynamiques de solubilité des minéraux permettent de prévoir l'évolution chimique des eaux durant leur concentration par évaporation. C'est la notion d'alcalinité résiduelle définie par EATON (1950). Ainsi, si l'on considère la calcite qui est un des premiers minéraux à précipiter en zone aride, l'alcalinité résiduelle calcite (Alc. res. cal.) est égale à :

$$\text{Alc. rés. cal.} = \text{Alcalinité} - \text{Ca (en meq/l)}$$

Lorsque cette quantité est positive, l'alcalinité est supérieure aux équivalents de calcium. Lorsque les eaux se concentrent et précipitent la calcite, l'alcalinité va croître contrairement à la teneur en calcium. L'évolution sera inverse si l'alcalinité résiduelle calcite est négative. L'alcalinité résiduelle est une grandeur conservatrice. Ainsi, tant qu'un autre minéral carbonaté ou calcique ne précipite pas, l'alcalinité résiduelle augmentera proportionnellement à la réduction de volume. En revanche pour les autres classifications telles que celle de RICHARDS (1954), la caractérisation de l'eau changera lors de sa concentration (BAHRI, 1982). Ainsi, l'alcalinité résiduelle constitue une caractéristique des eaux même lorsque leur composition change lors de leur concentration.

Ce concept a été étendu ultérieurement à la précipitation de plusieurs minéraux ; c'est l'alcalinité résiduelle généralisée (VAN BEEK et *al.*, 1973 ; DROUBI, 1976). Il permet de classer des eaux de même origine mais de concentrations diverses dans un même groupe, même si le rapport entre les divers ions est différent. Nous l'utiliserons donc pour reconnaître les différentes sources d'alimentation du Djajerud.

3. ZONATION DU BASSIN VERSANT DE DJAJERUD

3.1. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES CHIMIQUES DISCRIMINANT L'ORIGINE DES EAUX

La relation liant le SAR et la conductivité électrique a été représentée sur la figure 2, aussi bien pour les eaux de surface que pour les nappes. Pour chaque zone, les eaux superficielles et profondes présentent une relation unique. Ainsi, chaque partie du bassin versant possède ses caractéristiques chimiques propres. Les échantillons de la plaine s'individualisent par une forte conductivité électrique. En revanche, il est difficile de différencier les eaux de montagne et celles du piémont à partir des valeurs de SAR ou de conductivité électrique. Ces deux types d'eau se distinguent par la pente de la relation liant ces deux paramètres. Ainsi, les variations de conductivité électrique se traduisent par une élévation du SAR plus forte pour le piémont que pour la haute montagne. Ce phénomène ne peut être imputé à la concentration des eaux par évaporation. En effet, lorsque l'alcalinité résiduelle calcite est négative, la teneur en calcium augmente lorsque les eaux se concentrent et les variations du SAR sont modérées. Or dans le piémont les résultats analytiques sont différents. Les phénomènes de dissolution de l'halite, en quantités variables suivant le lieu sont plus conformes aux valeurs observées.

A partir de ce qui précède, nous avons défini trois types de composition chimique d'eau :

- les eaux carbonatées ($\text{Ca} < \text{SO}_4 < \text{HCO}_3$) dont l'alcalinité résiduelle est positive ;
- les eaux sulfatées ($\text{Ca} < \text{ou} > \text{HCO}_3 < \text{SO}_4$) moins alcalines que les précédentes ;
- les eaux chlorurées ($\text{HCO}_3 < \text{SO}_4 < \text{Cl}$) ;

ainsi que deux situations intermédiaires :

- les eaux carbonatées/sulfatées : dans ce cas, les eaux présentant un faciès limite qui oscille pendant la période considérée entre les eaux carbonatées et les eaux sulfates ;
- les eaux sulfatées/chlorurées : le faciès est alternativement sulfaté puis chloruré.

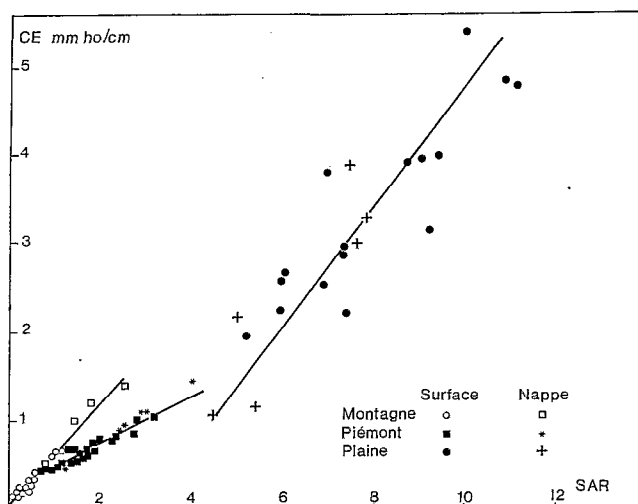


FIG. 2. — Relation liant le SAR à la conductivité électrique des eaux de surface et profondes pour les trois parties du bassin versant.

3.2. ZONATION EN PÉRIODE DE HAUTES EAUX ET DE BASSES EAUX

De nombreuses analyses d'eau du Djajerud ont été effectuées par le Ministère de l'Énergie d'Iran (1986). Ces centaines d'analyses se répartissent sur 17 années soit de 1968 à 1985, de manière assez régulière. Les prélèvements concernent les différentes parties du cours du fleuve et de ses affluents.

Un exemple de composition chimique du Djajerud en période de hautes eaux a été reporté dans le tableau I.

TABLEAU I
Analyse chimique du Djajerud et de ses affluents en période de hautes eaux (composition chimique en meq/l)

Station	rivière	date	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄
Fasham	Djajerud	mai 1986	0.1	2.30	0.38	0.50
Oshan	Ahar	mai 1986	0	2.00	0.12	0.60

Ali-Abad	Lavarak	mai 1986	0.3	2.20	0.80	2.04
Latyan	Djajerud	avril 1986	0	3.00	0.50	0.87
Mamiou	Djajerud	avril 1986	0	3.30	0.50	1.50
Kabou-Goonbad	Djajerud	mai 1986	0	2.90	1.20	3.64
Sharif-Abad	Djajerud	mars 1986	0	7.10	13.10	23.32
Sharif-Abad	Djajerud	avril 1985	0	3.50	5.30	13.40

Station	Ca	Mg	Na	K	pH	E.C. (mmho/cm)
Fasham	2.00	0.80	0.47	0.03	8.48	0.324
Oshan	1.70	0.65	0.33	0	8.36	0.255
Roodak	1.20	1.25	0.36	0.02	8.57	0.255
Ali-Abad	1.70	2.40	1.08	0.05	8.49	0.479
Latyan	2.40	1.20	0.62	0.03	7.87	0.390
Mamiou	2.60	1.50	1.34	0.03	7.74	0.511
Kabou-Goonbad	3.25	1.25	3.10	0.10	7.97	0.812
Sharif-Abad	7.50	11.70	23.50	2.20	7.45	4.214
Sharif-Abad	5.40	4.10	11.40	0.07	7.57	1.980

La zonation obtenue à partir de l'ensemble des analyses de cette période est présentée sur la figure 3.

Le même travail a été effectué pour la période des basses eaux. Un exemple d'analyses d'eaux figure dans le tableau II. La zonation obtenue pour cette période est reportée sur la figure 4.

des caractéristiques chimiques (tabl. III).

Lors des hautes eaux dues à la fonte des neiges, le Djajerud présente un faciès carbonaté en haute montagne et dans la partie amont du piémont. A la sortie du piémont, on constate une neutralisation des carbonates par le calcium provenant de la dissolution du gypse. Les eaux deviennent alors plutôt sulfatées. Au niveau de la plaine de Varamine, les nappes sont chlorurées mais les eaux sulfatées voire carbonatées du fleuve en crue s'infiltrent et le faciès chimique du Djajerud n'est pas influencé par celui de la nappe.

Lors des basses eaux, le faciès chloruré fait son apparition au niveau de la plaine de Varamine. Le type sulfaté s'impose dans tout le piémont et a tendance à s'étendre vers l'amont. En haute montagne, le faciès carbonaté subsiste

FIG. 3. — Zonation du faciès chimique en période de hautes eaux ; 1 : ville, 2 : cours d'eau, 3 : massif gypseux, 4 : marécage ; marécage ; 5, 6, 7 : faciès carbonaté, carbonaté-sulfaté, sulfaté.

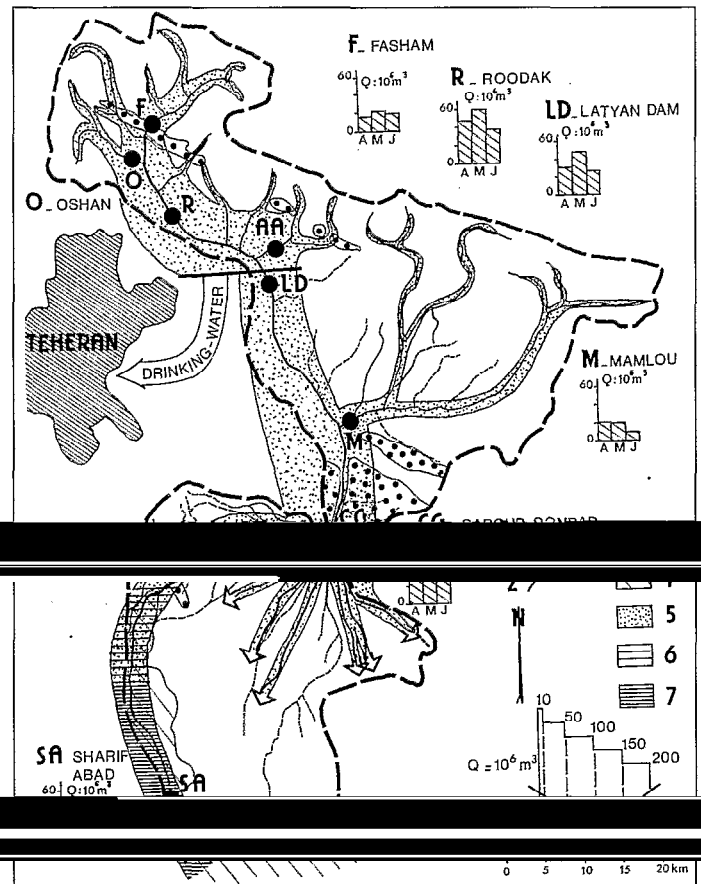


TABLEAU II.

Analyse chimique du Djajrud et de ses affluents en période de basses eaux (composition chimique en meq/l)

Station	rivière	date	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄
Fasham	Djajrud	août 1985	0	2.70	0.15	0.41
Oshan	Ahar	sept. 1985	0	2.60	0.27	1.25
Roodak	Djajrud	juin 1985	0.4	1.80	0.27	0.56
Roodak	Djajrud	oct. 1984	0	2.80	0.30	0.48
Ali-Abad	Lavarak	sept. 1985	0	2.85	1.70	3.57
Latyan	Djajrud	oct. 1985	0	2.35	0.57	0.88
Mamiou	Djajrud	août 1985	0	3.10	2.70	5.13
Sharif-Abad	Djajrud	août 1986	0	6.85	52.37	12.55
Sharif-Abad	Djajrud	sept. 1986	0.20	1.90	64.37	90.66

Station	Ca	Mg	Na	K	pH	E. C. (mmho/cm)
Fasham	1.80	1.15	0.29	0.03	8.11	0.325
Oshan	3.00	0.60	0.51	0.03	7.80	0.395
Roodak	1.90	1.00	0.28	0.03	8.47	0.275
Ali-Abad	2.45	0.55	0.38	0.02	7.92	0.335
Latyan	3.70	1.80	2.20	0.05	7.95	0.770
Mamiou	2.40	0.75	0.66	0.02	7.37	0.370
Kabou-Goonbad	2.25	2.65	5.15	0.08	8.08	1.045
Sharif-Abad	6.00	15.0	45.25	1.00	8.30	7.375
Sharif-Abad	19.20	24.8	120.	0.30	8.35	13.640

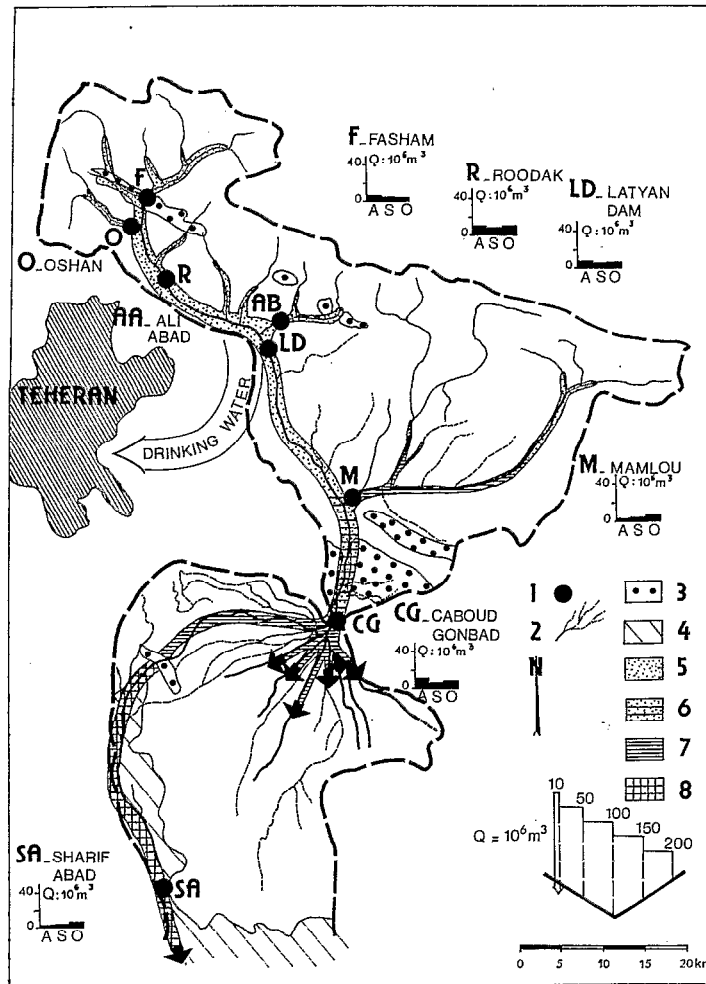


FIG. 4. — Zonation du faciès chimique en période de basses eaux. 1 : ville, 2 : cours d'eau, 3 : massif gypseux, 4 : marécage ; 5, 6, 7, 8 : faciès carbonaté, carbonaté-sulfaté, sulfaté, sulfaté chloruré.

TABLEAU III.
Composition chimique des eaux de nappes (en meq/l)

Localisation	pH	HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
Montagne	7,7	7,0	0,3	2,6	0,6	0,4	8,9
	9,4	8,0	3,2	1,2	4,0	4,6	3,8
	8,5	4,0	0,8	2,6	1,6	3,0	2,6
	7,5	6,4	3,6	4,6	4,8	1,8	8,0
Piémont	7,6	5,0	1,3	6,0	4,0	2,6	5,7
	8,0	3,4	2,4	7,0	3,6	1,4	8,8
	8,1	4,2	1,7	4,6	3,6	3,0	3,9
Plaine	8,2	5,0	10,0	4,8	2,5	2,5	14,8
	7,4	15,0	32,0	5,4	10,0	5,6	34,8
	8,0	5,8	28,0	18,0	14,0	15,0	22,8
	-	1,4	16,0	13,0	5,0	6,4	19,0

TABLEAU IV
Composition chimique des affluents du Djajerud en période de hautes eaux (en meq/l)

Zone	Localisation	Rivière	pH	HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺
Montagne	Magasah	Maygoun	7,80	3,20	0,50	0,65	2,45	1,35	0,60
	Aushan	Ahar	7,90	2,10	0,25	1,10	2,20	0,80	0,40
	Kamarkhani	Ammameh	8,10	2,30	0,25	0,35	2,10	0,40	0,40
	Narou	Afjeh	7,70	3,75	0,45	0,60	2,30	1,80	0,75
	Najarada	Galandoak	7,80	3,45	0,35	1,40	2,50	1,90	0,80
	Zirepol	Fasham	8,00	2,76	0,20	0,20	1,95	0,85	0,25
Piémont	Aliabad	Lavark	7,75	3,75	1,80	1,95	2,45	2,85	2,20
	Mamlou	Damavan	7,85	3,90	1,30	2,80	2,30	2,25	3,45

dans le Djajerud et dans certains de ses affluents. En revanche, les eaux des affluents qui traversent de petits massifs gypseux deviennent carbonatés/sulfatés voire sulfatés.

Toute l'année, les eaux deviennent de plus en plus chargées en sels d'amont vers l'aval. De même, on observe une augmentation générale de la conductivité électrique et donc de la salinité en période de basses eaux.

Ces premières constatations sont confirmées par l'observation des caractéristiques chimiques des affluents du Djajerud ; il convient d'utiliser ces zonations pour préciser la contribution de chaque réservoir dans le fonctionnement hydrique du Djajerud.

3.3. INTERPRÉTATION

Les trois faciès chimiques correspondent aux trois zones géologiques et climatiques.

Les eaux chlorurées sont typiques des nappes de la plaine de Varamine. Dans ce lieu, ces nappes sont proches de la surface, ce qui se traduit par un paysage de marécages salés. Toute évolution des eaux du Djajerud vers le faciès chloruré indique le drainage des nappes par le fleuve et donc une alimentation profonde en aval. Ceci se produit en période sèche lorsque le Djajerud est à l'étiage, c'est-à-dire lorsque son niveau s'enfonce au-dessous de celui des nappes. A cette période, la teneur en chlore du Djajerud à Sharif Abad est supérieure à celle des nappes (tab. II et III), ce qui traduit une concentration des eaux par évaporation. En revanche, lors des hautes eaux, la salure du Djajerud en ce point devient inférieure à celle des nappes (tab. I et III), et le fleuve alimente les nappes.

Les eaux sulfatées sont caractéristiques des sols se développant sur gypse. Le faciès sulfaté indique une alimenta-

une alimentation préférentielle par les affluents qui traversent les petits massifs gypseux d'altitude (Lavarak, Ahar et surtout Maygoun et Amameh). Toutefois, ce phénomène est rare du fait de l'abondance des eaux nivales. Il n'apparaît qu'après la fonte des neiges lorsque les nappes de cette zone alimentent ces affluents.

Le type carbonaté caractérise les eaux nivales de haute montagne, c'est-à-dire une alimentation superficielle.

L'augmentation de la conductivité électrique d'amont vers l'aval, depuis les hautes jusqu'aux basses eaux, traduit plusieurs phénomènes concomitants :

- (i) augmentation constante de l'aridité climatique depuis la haute montagne jusque dans la plaine de Varamine et du printemps jusqu'à l'automne, ce qui conduit à une concentration des eaux par évaporation ;
- (ii) rencontre de sels de plus en plus solubles (sulfate de calcium puis chlorure de sodium).

4. CONCLUSION

L'étude chimique des eaux du Djajerud permet d'apporter un certain nombre de précisions sur son fonctionnement hydrologique.

Lors de la période de sécheresse, les névés les plus hauts constituent une alimentation de surface en haute monta-

Au niveau du piémont, le drainage des nappes sulfatées et les pluies qui ruissellent sur les massifs gypseux imposent leur faciès sulfaté au Djajerud. Dans la plaine de Varamine, le fleuve à l'étiage draine les nappes chlorurées, ce qui constitue sa dernière source d'eau qui se perd dans les sédiments de la plaine plus à l'aval.

tie dans les trois zones géographiques.

En période de fonte des neiges, l'alimentation du fleuve est abondante, surtout en haute montagne. Le faciès carbonaté des eaux superficielles de cette zone s'impose sur une grande partie du cours du Djajerud. Les eaux originaires du piémont représentent un volume plus faible que les précédentes et ne peuvent modifier notablement ni le débit ni le faciès chimique. Dans la plaine de Varamine, les hautes eaux du fleuve s'infiltrent dans les sédiments et conservent parfois la marque carbonatée de leur origine d'altitude.

L'alimentation du Djajerud est superficielle lors des hautes eaux et son origine est essentiellement localisée dans les hautes montagnes.

Cette étude montre l'intérêt que revêt le concept d'alcalinité résiduelle généralisée.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 9 février 1990

BIBLIOGRAPHIE

- BAHRI (A.), 1982. — Utilisation des eaux et des sols salés dans la plaine de Kairouan (Tunisie). Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Toulouse, 155 p.
- BEEK (C.G.E. Van), BREEKMAN (N. Van), 1973. — The alkalinity of alkali soils. *Journal of Soil Science*, N° 24 : 129-136.
- BOURRIÉ (C.), 1976. — Relation entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO₂ dans les eaux naturelles. *Sciences du Sol* n° 3 ; 141-159 (Strasbourg France).
- DARVICH-ZADE (A.), MOTAMED (A.), 1985. — Introduction à l'étude morphogénétique et à l'étude pétrographique de l'Elbourz de l'éocène à l'actuel. *Cahiers Géologiques* N° 105 : 785-787 (France).
- DROUBI (A.), 1976. — Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. *Mémoire des Sciences Géologiques*, n° 46 : 1-177 (Strasbourg France).
- EATON (F.M.), 1950. — Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science* n° 69 : 125-133.
- Ministry of Energy. Water affairs (bureau of Water Resources Investigation). Surface-water section. Bulletin hydrologique, climatologique, hydrochimique et statistique des stations dans le bassin versant du Djajeroud de 1970 à 1985. Technical Report (Téhéran Iran).
- RICHARDS (L.A.), 1954. — Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. *Agriculture Handbook*, n° 60, 250 pp.
- VALLÈS (V.), 1988. — Modélisation des transferts d'eau et de sol dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. *Sci. Géol., Mém.*, 150 pp. (Strasbourg France).
- VALLÈS (V.), VALLÈS (A.M.), DOSSO (M.), 1983. — Irrigation des sols salés et doses de lessivage. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* ; vol. XX, n° 2 : 119-127. (Bondy France).
- VALLÈS (V.), BERTRAN (M.), N'DIAYE (M.), BOURGEAT (F.), 1988. — Utilisation du concept d'alcalinité résiduelle généralisée pour la prédiction du besoin en gypse des sols sodiques. Accepté pour publication dans *Agronom. trop.* (Montpellier France).