

HYDROCHIMIE DES EAUX, DISSOLUTION SPÉCIFIQUE ET SALINITÉ DES COURS D'EAU DANS LE BASSIN DE L'OUED LEBÈNE (Prérief Central, Maroc septentrional)

Abdelghani Gartet¹, Jaouad Gartet² y Carmelo Conesa García³

BIBLID [0213-1781 (2001); 34: 143-161]

RÉSUMÉ

L'étude des paramètres physico-chimiques de l'oued Lebène —dans le Prérief central marocain— aboutit à l'évaluation de la dissolution spécifique et à la caractérisation des faciès chimiques des eaux. Le caractère de la dissolution spécifique, étant excessif, fait que les eaux du Lebène bicarbonatées magnésiennes, à l'amont, deviennent chlorurées-sodiques dans la section moyenne et aval du cours d'eau. Les variations spatio-temporelles des éléments rocheux dissous dans l'eau permettent de calculer le volume moyen de roches dissoutes et donc le tonnage exporté. Parallèlement à ces aspects quantitatifs, la salinité des cours d'eau dans le bassin moyen et inférieur souligne l'implication des affleurements triasiques. Le lessivage des terrains traversés par les eaux de ruissellement et la contamination des eaux dans les massifs triasiques par les eaux des oueds font que la pollution devient très forte. Les interventions —dans le cadre des aménagements— restent insuffisantes puisque la pollution hydrique demeure forte.

Mots-clés: Hydrochimie des eaux, dissolution spécifique, matière en suspension, tonnage exporté, salinité, pollution hydrique, aménagement, Oued Lebène, Prérief central, Maroc.

RESUMEN

El estudio de los parámetros físico-químicos del oued Lebène —en el Prerif central marroquí— se centra principalmente en la evaluación de la disolución específica y en la

Fecha de recepción: 25 de septiembre de 2001. Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2001.

1 Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales, Faculté des Lettres et Sciences Humaines Saïss-Fès, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès (Maroc), E-mail: gartet.a@caramail.com

2 Docteur en Géographie physique de l'Université d'Aix-Marseille I, UMR-ESPACE, 6012 CNRS, Aix-en-Provence (France).

3 Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Regional. Universidad de Murcia. Campus La Merced. 30001 MURCIA (España). E-mail: cconesa@um.es

caracterización de las facies químicas de sus aguas. Aun siendo excesivo, el grado de disolución específica hace que las aguas del Lebène, bicarbonatadas magnésicas aguas arriba, se conviertan en cloruro-sódicas en los tramos medio e inferior de su curso. Las variaciones espaciotemporales de los elementos rocosos disueltos en el agua permiten calcular el volumen medio de las rocas disueltas y, por lo tanto, el tonelaje exportado. Paralelamente a estos aspectos cuantitativos, la salinidad de las cuencas media e inferior subraya la implicación de los afloramientos triásicos. El lavado de los terrenos atravesados por las aguas de escorrentía y la contaminación de las aguas en los macizos triásicos a través de los oueds hacen que la polución sea muy fuerte. Las intervenciones, en el marco de la ordenación territorial, resultan insuficientes ya que persiste un alto grado de polución hídrica.

Palabras clave: Hidroquímica de las aguas, disolución específica, materiales en suspensión, tonelaje exportado, salinidad, polución hídrica, Planificación, Oued Lebène, Prerif central, Marruecos.

INTRODUCTION

La dissolution spécifique et la salinité des cours d'eau dans le Rif méridional et le Prérif central et oriental est l'un des aspects érosifs les plus virulents. Dans le bassin versant de l'oued Lebène, l'érosion hydrique, en particulier l'érosion chimique, pose des problèmes multiples; les principaux sont ceux liés à la détermination de l'origine des substances transportées et à leur quantification. Cet aspect de la dynamique découle des mécanismes complexes de la morphogenèse des versants et de l'hydrodynamisme des oueds (A. Gartet, 1994). En effet, mise à part la grande susceptibilité des roches à l'érosion, les fréquentes variations climatiques et hydrologiques semblent constituer des conditions suffisantes à l'entraînement et aux transports des matériaux. D'ailleurs, l'oued Lebène qui veut dire en arabe «petit lait», est une allusion faite à sa couleur blanchâtre et boueuse en périodes de crues. Il est considéré —par l'importance du stock alluvionnaire— comme un puissant convoyeur de matière en suspension mais surtout en solution.

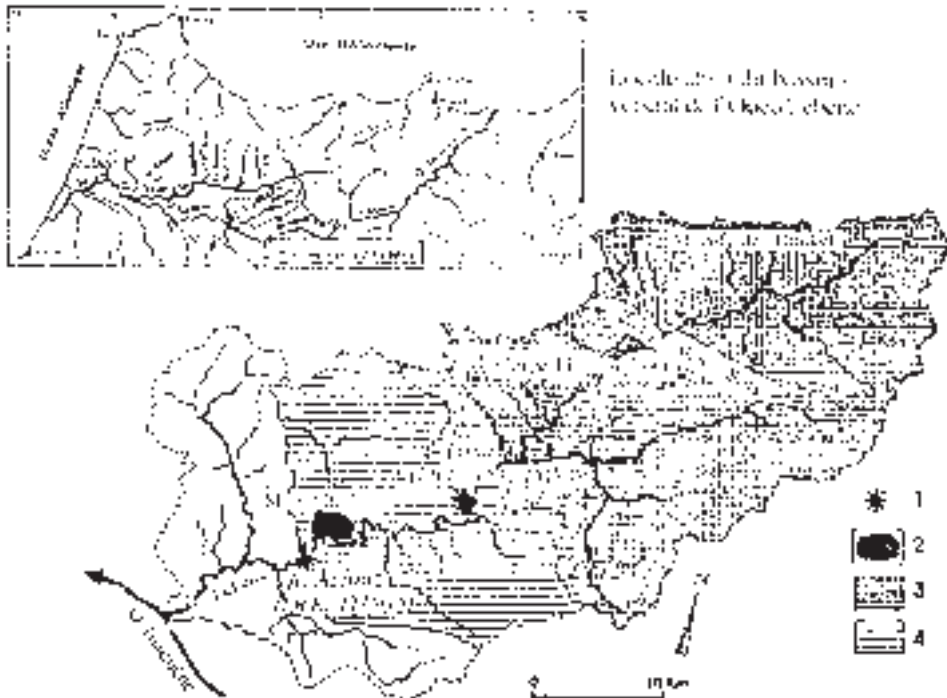
L'étude porte sur la caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux, leur variation spatio-temporelle ainsi que la détermination des faciès chimiques des eaux dans le bassin versant. À travers l'analyse de la dissolution spécifique, l'étude aboutit à l'évaluation du tonnage exporté par le Lebène et le volume moyen de roches dissoutes. Parallèlement à ces aspects quantitatifs, la salinité des cours d'eau et l'ampleur de la pollution hydrique dans les sections moyenne et inférieure de la vallée soulignent l'implication des affleurements triasiques.

I. PRÉSENTATION DU BASSIN ET DES DONNÉES HYDROCHIMIQUES

Le bassin de l'oued Lebène (1382 km² de superficie) s'inscrit dans la zone de transition entre les montagnes du Rif méridional (800-1700 m) et les basses collines (300-600 m) du Prérif central et oriental (Fig. 1). Le cours sculpte son tracé, à l'amont (456 m) dans des roches résistantes (calcaires, dolomies, grès et flyschs) et parcourt des terrains fragiles (marno-calcaires, marnes blanches à silex, marnes à intercalation de bancs de grès et

marnes tendres du complexe triasique) jusqu'à sa confluence avec l'oued Inaouène à une altitude de 149 m. Le long des 110 km, la vallée présente une alternance de secteurs étroits et de vallées larges. Elle est, à l'amont, localement étroite (< 50 m), encaissée et dominée de versants raides (< 100 m); l'oued Lebène coule dans un canyon orienté NNE-SSW, où la pente hydraulique varie sur de faibles distances (3 à 0,2‰). Alors que dans le cours moyen et inférieur la pente devient faible (0,2‰) et l'oued particulièrement sinueux dans des vallées larges de 2 à 5 km, intercalées de couloirs taillés dans les grès en forme de gorge.

Le régime hydrologique, typiquement méditerranéen, se calque sur celui des pluies et se caractérise par l'extrême irrégularité à la fois spatiale et temporelle. D'une part, les étés sont secs avec des étiages profonds ($Q_e = 0,5$ à $0,01$ m³/s) et où la pénurie est de 3 à 4 mois/ an). D'autre part, les hivers sont pluvieux et humides ($P > 1000$ mm à l'amont et entre 500 et 600 mm à l'aval) provoquent des pluies fortes et continues (où $P > 30$ mm/j constituent 82% du total). Ceci engendre la propagation de l'écoulement en nappe, puis



1- Station de jaugeage et de mesures hydrochimiques (Tissa: I.R.E. 1542/15; Aouled Azzouz: 2275/15), 2- Massif gypso-salin de Tissa, 3- Bassin versant ($S = 792$ km²) en amont de la station Tissa Boukerkour (Rif méridional), 4- Bassin versant ($S = 1082$ km²) en amont de la station A. Azzouz (Prérief central).

FIGURE 1. Le bassin versant de l'oued Lebène: localisation des points de mesures hydrochimiques et du massif gypso-salin de Tissa.

concentré, encombrant le réseau de drainage malgré sa forte densité (2,94 km/km²). Les débits de crues sont importants ($Q_c > 120 \text{ m}^3/\text{s}$), les débits journaliers de crues dépassent les 400-500 m³/s et ceux des pointes de crues atteignent 1200 m³/s (A. Gartet, 1994 et 1999). Les crues les plus redoutables se caractérisent par leur soudaineté et leur violence; elles se manifestent par des submersions actives engendrant — par les divagations et les défluviations répétées — la destruction des installations humaines situées aux rivages du cours d'eau.

II. PRÉSENTATION ET CRITIQUE DES DONNÉES ET CARACTÉRISATION DES FACIÈS HYDROCHIMIQUES

La série de données hydrochimiques des eaux du Lebène, recueillies auprès du Service de l'Hydraulique à Fès, est incomplète et discontinue. Malgré cet handicap, ces données s'avèrent utiles dans l'étude de l'évolution spatio-temporelles des constituants physico-chimiques. Néanmoins, ne possédant que deux points de prélèvements (Tissa et Aouled Azzouz) pour les cycles hydrochimiques antérieurs à 1988, un certain nombre d'échantillons⁴ a été prélevé en trois points différents, et ce, de l'amont à l'aval:

- à l'amont, dans les gorges d'El Gharghour, situées dans la zone des Sofs⁵;
- sur le cours moyen du Lebène, à la station Tissa-Boukerkour;
- à l'aval du diapir de Tissa, à proximité de l'ancienne station d'Aouled Azzouz.

Les analyses physico-chimiques des deux derniers points de prélèvement sont les principales. Elles permettent de tracer les courbes d'évolution des principaux constituants physico-chimiques, leurs rapports, les quantités de sels dissous ainsi que les variations amont-aval de la composition des eaux, en particulier, par rapport au diapir de sel de Tissa.

TABLEAU 1
Évolution amont-aval des constituants chimiques des eaux

Points de prélèvement	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Résidu sec mg/l
Gorges El Gharghour	125	53	68	2,0	105	168	172	692
Tissa Boukerkour	62	30	199	2,9	321	134	153	843
Aouled Azzouz	67	29	362	2,8	772	130	132	1569

Source: DRH- FÈS, complété par d'autres prélèvements entre 1988-1989.

4 Les analyses physico-chimiques des eaux du Lebène ont fait l'objet de mesures partielles, effectuées par les services de l'Hydraulique à Fès. Elles ont été complétées par des prélèvements ultérieurs à 1987 et ont été analysés au Laboratoire de la chimie des eaux de la R.A.D.E.E.F.-Fès.

5 Relief en bande étroite orienté Est - Ouest, hautement dréssé, qui se développe au milieu d'une topographie molle. Le faciès lithologique des sofs (spécifiques à la région préifaine) est constitué essentiellement des calcaires massifs du Jurassique et des dolomies du Lias.

2.1. Les paramètres physiques des eaux de l'oued Lebène

Les analyses physiques des eaux ont été effectuées entre 1960 et 1988, avec une fréquence moyenne mensuelle de deux prélèvements. Elles concernent essentiellement la température de l'eau, le pH et la conductivité.

- **La température de l'eau:** Il est reconnu que les variations des températures de l'air s'estompent au-delà de 3 m de profondeur et que la température des eaux souterraines est invariable au cours de l'année (F. Petit et M. Erpicum, 1987). Au Lebène, les températures des eaux varient d'un secteur à l'autre. À l'amont, les variations thermiques sont faibles, alors que dans les secteurs moyen et inférieur du bassin, ces variations deviennent fortes et assez proches de celles des températures moyennes de l'air.
- Dans le secteur des gorges, les températures de l'eau de l'oued, comme celles des sources oscillent entre 14 et 19°C, elles se classent donc —selon la classification de Schoeller de 1962 (in J. Nicod, 1973)— parmi les sources relativement froides. Cette semi-homothermie est à mettre en rapport avec l'importance des réservoirs karstiques de la zones des Sofs. Ce qui confirme le rôle du stockage des eaux de saison froide et leurs écoulements au cours de l'été suivant (J. Nicod, 1976 et 2000). En amont, les faibles températures de l'eau (12 et 16°C) s'explique par l'alimentation en eau provenant du Nord, des zones de hautes altitudes, et par la structure des nappes charriées. On pourrait même supposer une alimentation en eau souterraine, d'origine lointaine, qui pourrait provenir du bassin de l'Ouergha, par le Nord et le Nord-Ouest⁶.
- Dans le Lebène prériefain, la température de l'eau présente les mêmes variations que celles des températures ambiantes; ces variations sont liées au rythme thermique saisonnier. Les valeurs se calent dans la fourchette 15°C–26°C, ce qui est effectivement assez proche de la température de l'air.
- **Le pH des eaux:** Le pH est important à connaître; car, connaissant les teneurs de CO₂ dissout, il permet indirectement l'évaluation de l'agressivité chimique des eaux. Au Lebène, il est généralement supérieur à 7. Sur le cours principal, il est compris entre 7,2 et 8. À l'amont, le pH des sources et des eaux issues des aquifères vraisemblablement profonds est, par contre, très largement inférieur à 7,4. Cette faible alcalinité des eaux s'explique par l'abondance du CO₂ dissout dans les aquifères des formations jurassiques et liasiques, situés à l'amont et dans la zone des sofs.
- **La conductivité:** Elle est l'expression de la charge dissoute et rend compte de la minéralisation des eaux par la quantité d'ions en solution (J. Nicod, 1973). Sur cette question, on ne dispose que de rares mesures. Les valeurs disponibles présentent des variations assez importantes et oscillent entre 930 et 1560 $\mu\text{s/cm}$. Les conductivités les plus élevées sont marquées à la fin des périodes d'étiage. Les plus

6 En l'absence de traçage, on ne peut affirmer cette hypothèse. Néanmoins, l'abondance des sources, en particulier celles situées sur les mi-versants des Jbels Koulla et Drinkel, qui ne tarrissent pratiquement plus, paraît la conforter.

faibles sont enregistrées, par contre, pendant les périodes de hautes-eaux. En effet, la forte conductivité des eaux du Lebène résulte particulièrement des teneurs en chlorures de sodium; celles-ci sont constamment élevées ($Cl^- = 356$ mg/l à Tissa et 763 mg/l à A. Azzouz) (A. Gartet, 1994).

2.2. Les paramètres chimiques

Les éléments chimiques des eaux permettent de connaître, d'abord, la nature de la composition, la prédominance quantitative de certains éléments; ensuite, d'évaluer l'agressivité physico-chimique des eaux et, par conséquent, le taux d'éléments solubles transportés (Tabl. 1 et Fig. 2). Les principaux éléments sont:

- **Le Calcium (Ca^{2+}):** les teneurs en calcium sont relativement modestes, avec une moyenne de 40 à 60 mg/l. La courbe de concentration de cet élément exprime de fortes variations entre deux valeurs extrêmes: de 26 mg/l en juillet 1967 à 130 mg/l en mai 1966. Les faibles teneurs s'expliquent par le fait que les eaux pluviales, devenues ruisselantes, n'ont pas eu le temps de se saturer. Leur dureté est d'autant plus élevée que l'alimentation par les eaux des sources (réservoirs karstiques) est importante.
- **Le Magnésium (Mg^{2+}):** les valeurs sont nettement inférieures à celles du calcium. Elles varient entre 6,1 mg/l (mars 1965) et 51,3 mg/l (mai 1964). Les teneurs moyennes en magnésium se situent entre 15 et 35 mg/l. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées durant la saison sèche, en particulier, lors des années de sécheresses climatiques et hydrologiques. Ce qui est à mettre en relation avec le caractère du climat semi-aride et sub-humide de cette région.
- **Le groupe Sodium- Chlorure ($Na^+ - Cl^-$):** il est le plus dominant par rapport aux autres éléments chimiques. Les valeurs du sodium sont fortes, avec une moyenne autour de 125 mg/l. Les maxima dépassent les 300 mg/l. Quant aux chlorures, leur concentration, corrélable à celle du sodium, est trop forte. La moyenne se situe autour de 200 mg/l. Les halites, ayant un degré de solubilité particulièrement important, sont soumis à la dynamique des eaux fluviales. Ces fortes concentrations sont à mettre en relation avec l'altération des roches riches en éléments sodiques et le rôle du lessivage des eaux pluviales. D'autre part, cet enrichissement en Na Cl est dû à la contamination par les affleurements triasiques, en particulier celui du diapir de Tissa.
- **Les Sulfates (SO_4^{2-}):** ils sont bien représentés, les teneurs moyennes oscillent entre 60 et 120 mg/l. Les maxima peuvent atteindre les 240 mg/l (septembre 1966) et un minimum de 50 mg/l (mars 1964).
- **Le Bicarbonate et le Dioxyde de carbone ($HCO_3^- - CO_2$):** le taux des bicarbonates dans les eaux du Lebène atteint un maximum de 281 mg/l et un minimum de 31,5 mg/l, avec des valeurs moyennes comprises entre 150 et 250 mg/l. Quant aux valeurs du Dioxyde de carbone (CO_2), elles montrent des fluctuations similaires à celles des bicarbonates. Les maxima en CO_2 atteignent 15 mg/l, alors que les minima sont de 3 mg/l.

L'évolution de ces deux éléments atteste d'une origine commune vraisemblablement par dissolution du calcaire dans les réservoirs karstiques. L'existence des roches carbonatées dans la partie septentrionale du bassin versant explique les teneurs élevées à l'amont et leur diminution progressive vers l'aval.

- **Le Potassium (K^+)**: ses valeurs sont relativement faibles. Les valeurs moyennes de la série oscillent autour de 3 mg/l. Les maxima et les minima sont respectivement 5,8 mg/l et 0,05 mg/l.

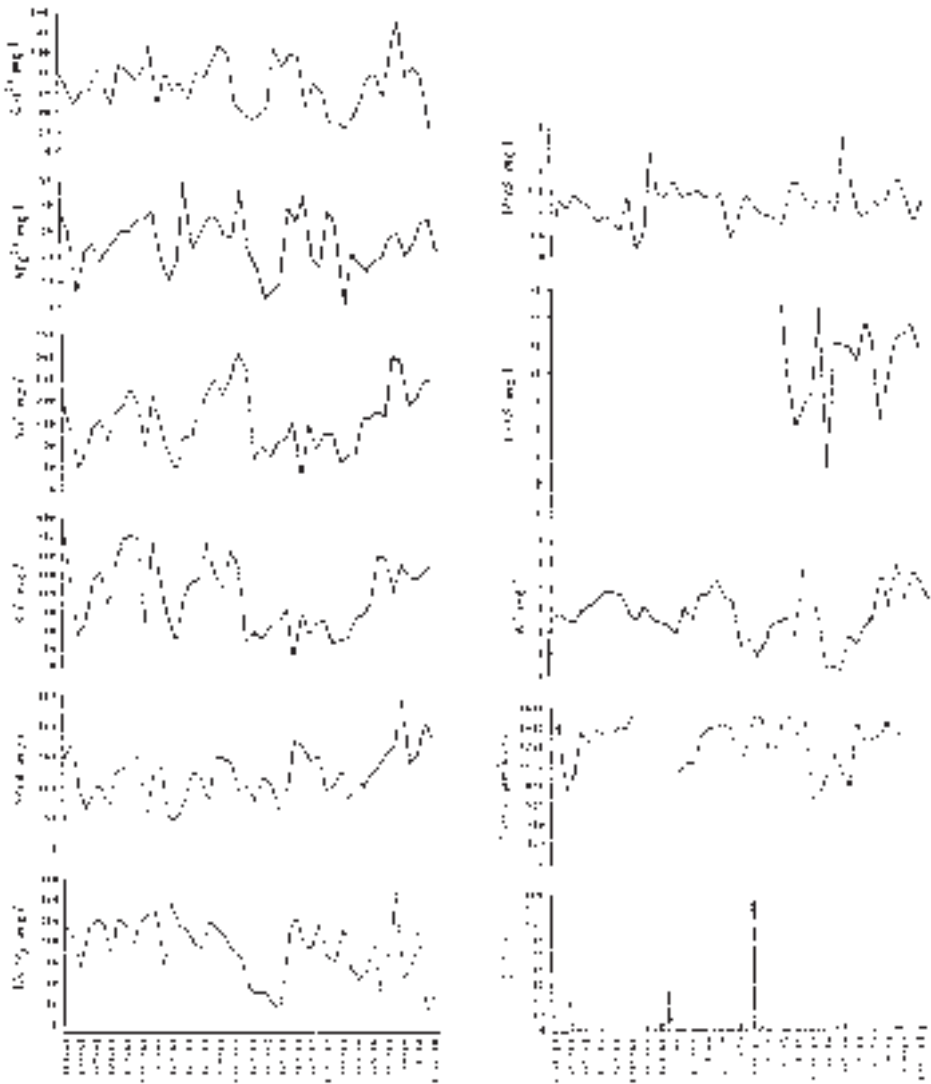


FIGURE 2. Variations temporelles des éléments chimiques des eaux du Lebène.

L'analyse géochimiques des eaux nous a permis de montrer la diversité des constituants. En effet, la concentration de chaque élément n'est pas constante au cours du temps (série de mesure: 1962-68). Certains éléments sont plus abondants que d'autres (en particulier Na^+ , Cl^- et HCO_3^-). Les courbes d'évolution des constituants chimiques ne sont pas superposables, bien que le rythme de leurs évolutions soit identique, tels que $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$.

L'étude des propriétés chimiques permet-elle d'aboutir à la caractérisation des bassins d'alimentation et des faciès chimiques dans lesquels les eaux sont susceptibles de séjourner longtemps ou de transiter rapidement?

2.3. Les faciès chimiques des eaux du Lebène

L'analyse des eaux du Lebène ont montré l'existence de plusieurs éléments chimiques. Ces derniers permettent de dégager des groupes à comportement commun qui reflètent des faciès chimiques, dont les plus dominants sont les suivants:

- **Le faciès chloruré-sodique:** il est représenté par les eaux salées apportées par le Lebène et ses affluents. Ces eaux, provenant du lessivage des terrains triasiques gypso-salifères, sont caractérisées par une forte concentration liée à la grande solubilité des sels; ce qui leur donne une forte salinité primaire et une alcalinité secondaire.
Pour les eaux du Lebène à Tissa, et surtout celles à A. Azzouz, le calcium l'emporte généralement sur le magnésium donnant au rapport $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ une valeur inférieure à 1. Elle est de l'ordre de 0,62 et peut s'élever dans les cas extrêmes à 1. Notons que ce rapport varie avec les variations des débits. Il augmente pendant les périodes sèches de l'année et, inversement, baisse avec l'augmentation des débits en hivers et au printemps.
- **Le faciès bicarbonaté magnésien:** il est représenté par les eaux du bassin supérieur et celles des aquifères de la zone des Sofs. Ces eaux proviennent des affleurements calcaires et dolomitiques de la région de Beni-Frassène. Le broyage, favorise la dissolution de la dolomie par un contact eau - roche plus long. Le rapport $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ est de 0,48 en moyenne; ce qui traduit l'importance des aquifères liasiques et jurassiques du bassin supérieur.
- **Le faciès bicarbonaté calcique:** il correspond aux eaux provenant des massifs calcaires, calcaro-gréseux et des lithostrômes des unités charriées du Rif. Le rapport $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ varie dans le détail entre 0,35 et 0,60. Selon les rapports de la Société Chérifienne de pétrole au Maroc, ce faciès est localement magnésien (R. Frey, 1933).

La caractérisation des eaux du Lebène exprime l'abondance en eaux chlorurées sodiques, liées au lessivage des terrains triasiques, la présence relative des eaux calciques issues des sources douces des massifs calcaires, calcaro-gréseux et schisteux et, enfin, des eaux magnésiennes localement répandues dans les formations gréseuses. La figure 3 exprime la répartition des constituants chimiques où les proportions des substances chlorurées sodiques sont extrêmement fortes.

Par ailleurs, les nappes et les réservoirs du bassin sont déterminés par des paramètres hydrogéologiques. Entre les secteurs rifains, à l'amont, et les secteurs pré-rifains, à l'aval, les différences sont très nettes.

- ***Dans les secteurs rifains du bassin:*** les unités susceptibles d'emmagasiner l'eau pluviale sont peu étendues. Il s'agit principalement des unités lithologiques charriées du Rif méridional (amont du B.V.) et des alluvions quaternaires du système fluvial.

Les premières sont constituées des calcaires jurassiques, des formations gréseuses et des schistes fortement altérées (J.-C. Vidal, 1971 et 1984). La fissuration et le broyage de ces séries facilitent la circulation des eaux. Les sources jaillissent à des altitudes comprises entre 800 et 1000 m, à la faveur des failles principales chevauchantes, orientées W-E. Les principales sources se situent aux Jbels Keil, Koulla et Drinkel, à l'extrémité Nord du bassin. Alimentées par des réservoirs puissants dans des formations épaisses, ces sources ne tarissent pratiquement plus et assurent un débit relativement fort ($Q = 5 \text{ à } 8 \text{ l/s}$).

La deuxième unité est formée d'alluvions quaternaires où existent un underflow qui fournit un débit important et où l'eau est claire, douce et fraîche.

- ***Dans les secteurs pré-rifains du bassin:*** le caractère commun est l'absence de nappes aquifères étendues, bien que les points d'eau (sources et puits) soient nombreux, mais assez souvent salés et rarement productifs. Dans cette zone, le problème de la quantité mais surtout de la qualité des eaux, se pose avec acuité. Par exemple, au massif de Tissa, la source salée titre 319 g/l de sels; elle provoque ainsi une contamination directe des eaux de l'oued et une pollution spectaculaire liées à la forte dissolution des sels dans les formations triasiques du massif (Fig. 4).

2.4. Relation conductivité-éléments rocheux dissous dans l'eau

L'indice «K» est le rapport des éléments de roches en mg/l à la conductivité en $\mu\text{s/cm}$. Il permet de mettre en rapport la conductivité et la teneur des eaux en sels (B. Hakim, 1982). Il permet aussi de déterminer le degré de concentration des sels dans les eaux. Son évaluation au Lebène, à base de 13 analyses, est de 0,62. Cette valeur traduit l'importance particulière des éléments chimiques appartenant au groupe des halites présents, en abondance, dans les injections diapiriques.

2.5. Degré de saturation, d'équilibre et d'agressivité des eaux du Lebène

Les courbes d'équilibres de H. Roques (1967) autorisent une meilleure approche de l'évaluation de l'agressivité théorique, de l'état d'équilibre et de la saturation des eaux que celles de J. Tillmans, F. Trombe et Schmit (cités dans G. Fabre, B. Hakim et J. Nicod, 1976).

Ce procédé est appliqué aux moyennes mensuelles des analyses hydrochimiques des eaux du Lebène (Fig. 5). Toutefois, nous faisons réserve sur l'utilisation de ce diagramme vu l'abondance des sels.

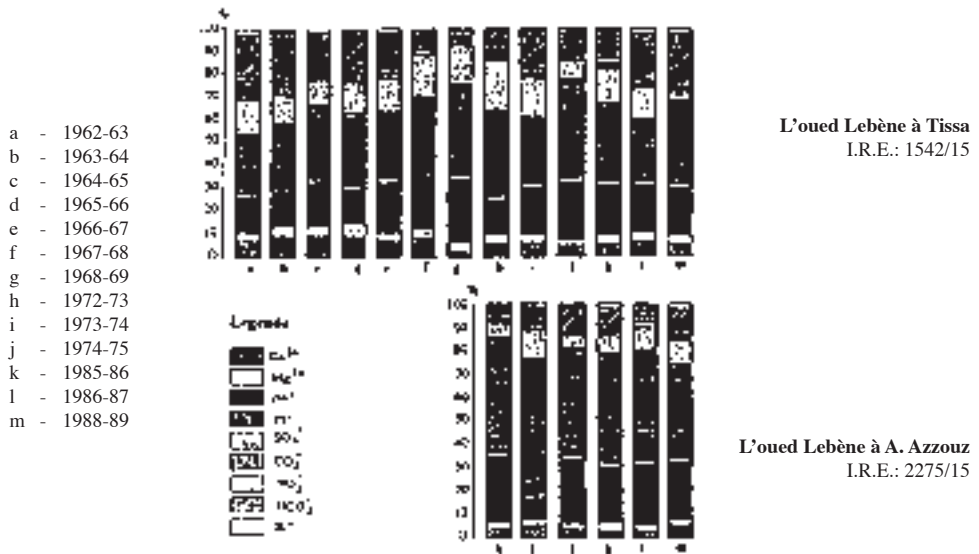
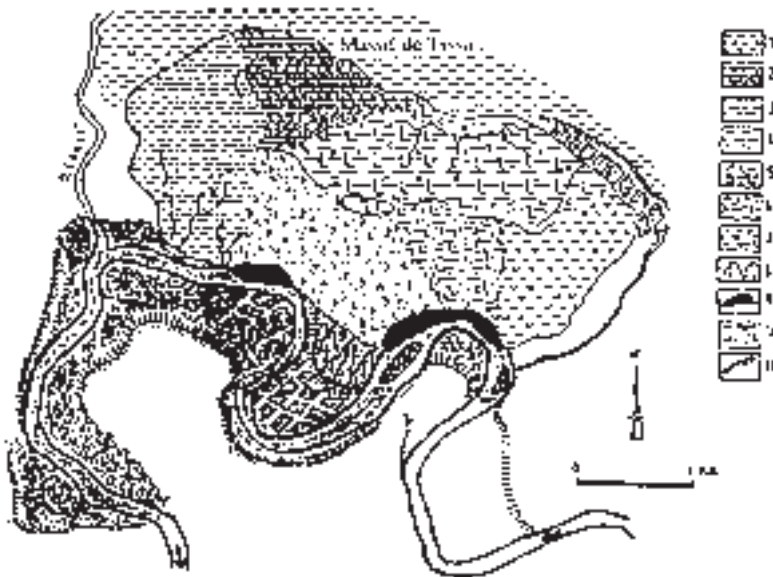


FIGURE 3. Composition (en %) des principaux éléments chimiques du Lebène.



1- Massif ophitique, 2- marno-calcaires crétacés, 3- marnes blanches à silex, 4- marnes miocènes, 5- argiles et marnes rouges du complexe triasique, 6- halite, gypse et anhydrite, 7- effondrement des blocs de gypse, 8- petits cônes de déjection à matériel fin, 9- zone de contamination directe des eaux par les sels, 10- salines (bassins de décantation), 11- rebord de basse et très basse terrasse.

FIGURE 4. L'oued Lebène au massif de sel de Tissa: dissolution spécifique et pollution hydrique.

- À *Tissa*, les eaux sont bien groupées, à la fois, dans les zones d'équilibre et d'agressivité. Elles sont équilibrées ou presque durant les mois de janvier, de mars à mai, de juillet et de septembre à novembre. Au cours des autres mois, les eaux sont relativement agressives. Cette agressivité est effective durant les mois de février, juin, août et octobre. Le titre hydrotimétrique (TH °F)⁷ fluctue légèrement entre 36 et 43°F, alors que le pH reste compris entre 7,3 et 7,8 °F.
- À *A. Azzouz*, les eaux se répartissent de part et d'autre de la zone d'équilibre. Elles sont équilibrées pendant 4 mois uniquement (mars, mai, juillet et septembre) et ne sont apparemment saturées que pendant novembre et décembre. L'agressivité concerne, par contre, les six mois restants (janvier, février, avril, juin, août et octobre).

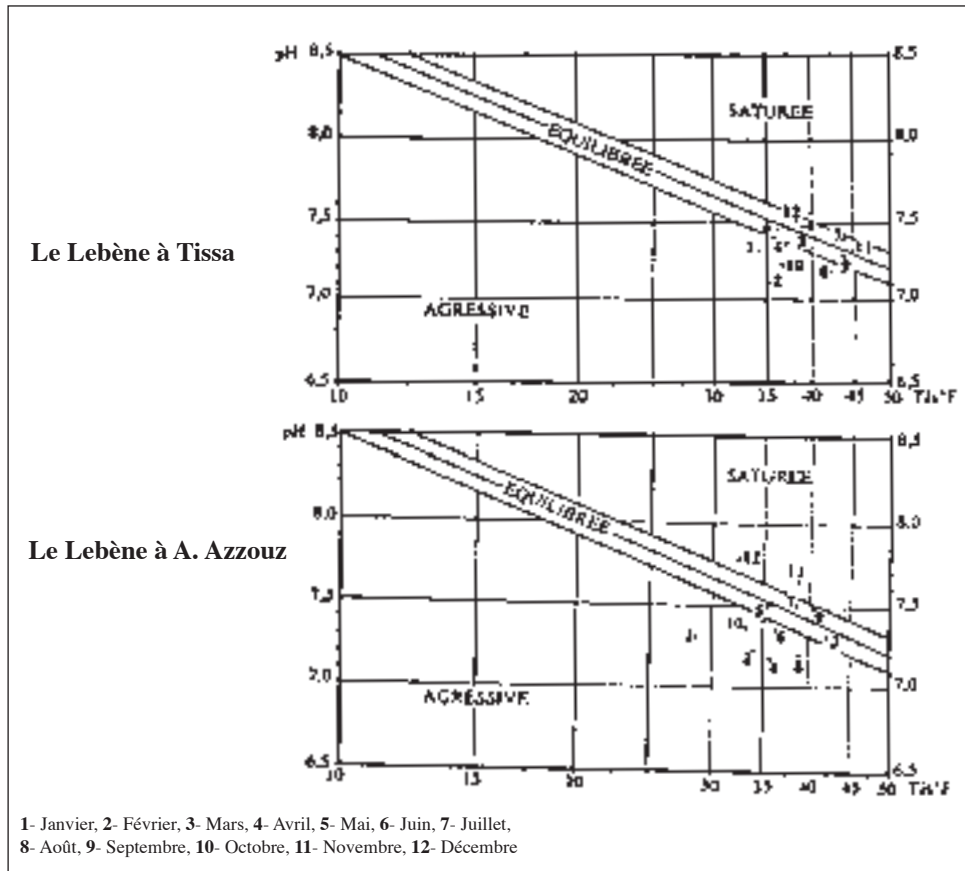


FIGURE 5. Diagramme d'équilibre pH/TH mensuel (courbes de Roques).

7 Le TH ou titre hydrotimétrique est un indice qui permet d'estimer la dureté d'une eau. On l'obtient en totalisant le calcium et le magnésium qu'elle contient. Etant donnée que le TH est exprimé en degrés français, les teneurs en milliéquivalent sont multipliées par 5.

Le TH (°F) est compris entre 28 et 42 et les variations du pH sont, comme à Tissa, assez légères (7,2 à 7,6 °F).

Dans l'ensemble, on constate que sur les courbes de Roques, le degré d'agressivité des eaux est faible et presque identique dans les deux points de mesure. Cette agressivité s'explique par l'arrivée tardive des eaux issues des aquifères carbonatés. Alors que la saturation n'est que faiblement représentée. Néanmoins, les variations les plus notables s'effectuent à l'échelle mensuelle et saisonnière, liées aux fluctuations des régimes des pluies et des débits.

III. ÉVALUATION DE LA DISSOLUTION SPÉCIFIQUE AU LEBÈNE

Afin d'évaluer l'importance de la dissolution et de la dégradation spécifique au Lebène, la méthode préconisée par B. Hakim (1982) a été adoptée. Son utilisation permet de calculer les exportations des éléments évacués, de déterminer leurs origines et d'évaluer le taux de la dégradation dans le bassin.

3.1. Les éléments de roches évacuées: origines et caractères de la dissolution

Les valeurs hydrochimiques des eaux présentent des taux élevés en éléments rocheux qui oscillent entre 500 et plus de 1900 mg/l. La moyenne s'élève à 1200 mg/l. Ces taux élevés résultent de la domination des éléments salins et gypseux: forte concentration des chlorures (Cl^-), des sulfates (SO_4^{2-}) et du sodium (Na^+) et du calcium (Ca^{2+}). Ces éléments solubles constituent dans certains cas plus de 80% du total en éléments rocheux évacués par le Lebène.

La méthode préconisée permet de distinguer trois ensembles de familles d'eau dans le bassin, regroupés dans le tableau suivant:

TABLEAU 2
Éléments de roches évacuées dans le bassin du Lebène

Points de prélèvement	Éléments carbonatés (E.C.)	Éléments salins et gypseux (E.G.S.)	Éléments de roches évacués (E.R.E)
— Gorges d'El Gharghour	263	343,2	606,2
— Le Lebène à Tissa	167	657	824
— Le Lebène à A. Azzouz	160,8	1 266,8	1 427,6

- *L'ensemble des éléments d'origine carbonatée* (E.C. = $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} + (\text{HCO}_3^{2-} / 61) \times 30$). Il représente respectivement, de l'amont à l'aval, 44%, 29% et 27% du total des roches évacuées. Ce groupe domine à l'amont; elle s'explique par la dissolution active des carbonates.

- **L'ensemble des éléments gypseux et salins** (E.G.S. = Ca^{2+} ou Mg^{2+} excédentaire + Na^+ + K^+ + Cl^- + SO_4^{2-}). Il représente respectivement, de l'amont à l'aval, 15%, 29% et 56% du total des roches évacuées. Les eaux sont riches en éléments provenant des formations triasiques qui renferment des sels et des lentilles de gypses.
- **Le troisième ensemble** (E.R.E.) résulte de la sommation des deux ensembles précédents. Il représente le total des roches évacuées (E.R.). Il caractérise les eaux de l'ensemble du réseau de drainage du bassin.

En définitive, les variations dans les teneurs en eau du Lebène traduisent:

- le lessivage des terrains traversés;
- le mélange d'eau de provenances différentes;
- le caractère excessif de la dissolution, en particulier des halites;
- la rapidité de la dissolution et la faible résistance mécanique des évaporites et des roches associées.

3.2. Relation débit-tonnage exporté au Lebène à Tissa

La relation débit liquide-débit solide aboutit à une interprétation, à la fois, d'ordre hydrochimique et hydrodynamique. Elle permet d'évaluer l'activité érosive chimique des eaux dans l'ensemble du bassin en amont de la station Tissa.

Étant donné que le débit moyen annuel du Lebène à Tissa est de 7 400 l/s, avec un taux d'éléments rocheux moyen de 840 mg/l, le tonnage exporté en fonction de ce débit peut être évalué selon l'équation suivante:

Concentration (en mg/l) \times débit (en l/s) \times nombre de secondes du jour.

La quantité est alors: $7\,400 \times (840/10^9) \times 86\,400 = 537,06$ tonnes/ jour. Pour une seule année, nous aurons: $537,06 \times 365,25 = 196\,126$ tonnes pour le bassin en amont de la station Tissa.

En valeur spécifique, le taux d'érosion devient: $196\,126 / 792 = 248$ tonnes/ km^2 / an.

La densité adoptée est celle de 2,3, valeur comprise entre la densité des carbonates (qui est de 2,6) et celle des sulfates et des chlorures (qui est de 2,1). Le volume de roches dissoutes est donc:

V.R.D. = $247,67 / 2,3 = 108$ m^3 / km^2 / an; ce qui représente 108 mm par millénaire.

3.3. Variations interannuelles des tonnages exportés

Les variations interannuelles du tonnage exporté par le Lebène sont importantes (Tabl. 3 et Fig. 6). Elles varient en fonction des précipitations et des débits. D'après les valeurs annuelles de la série examinée, il existe de fortes corrélations entre les débits liquides et les débits solides.

Le volume du tonnage exporté par le Lebène dépend des précipitations et des débits. Les variations sont nettes; ce qui explique parfois l'exportation de plus de 70% du total en de brèves périodes. En effet, l'analyse des rapports débit —dissolution et débit— tonnage

TABLEAU 3
Variations annuelles des matières dissoutes et des tonnages exportés

Éléments de la dissolution	Année humide	Année sèche	Moyenne
— Précipitations (en mm/ an)	753,1	403,7	553,6
— Débit moyen (en m ³ /s)	18,06	2,95	6,57
— Éléments rocheux (mg/l)	1 076,05	706,5	840
— Tonnage exporté en t/an	3 492,96	139,58	1 153,2

exporté exprime de fortes corrélations et explique la dépendance des débits solides des débits liquides et la croissance linéaire des tonnages exportés avec les débits, où «R» = 0,979 (Fig. 7).

En définitive les variations spatio-temporelles des teneurs sont très marquées, étant donnée la présence des carbonates à l'amont et des chlorures dans les sections moyenne et aval du bassin. Pour l'ensemble des éléments rocheux évacués, à partir d'un certain débit, les proportions des teneurs deviennent constantes et le tonnage exporté croît linéairement avec les débits.

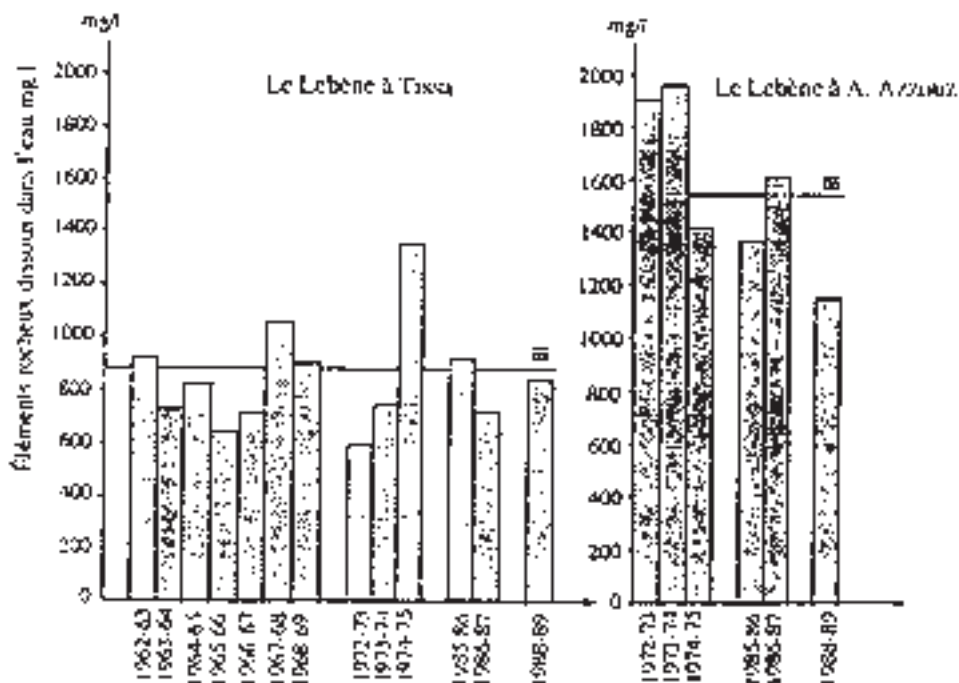


FIGURE 6. Variations annuelles des transports en solution au Lebène.

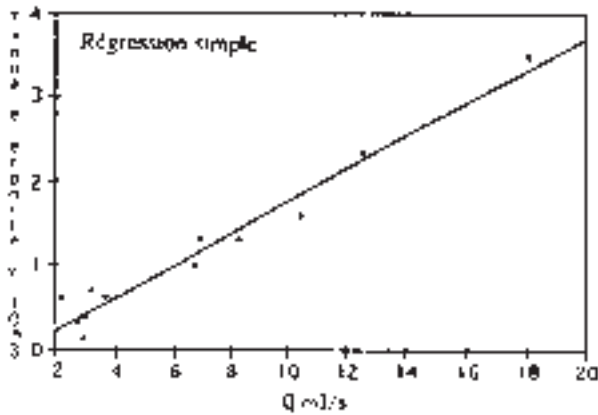


FIGURE 7. Corrélation tonnages exportés / débits annuels du Lebène.

IV. VARIATIONS ET RÉPARTITION DES EAUX SALÉES AU LEBÈNE: PROBLÈMES DE SALINITÉ ET DE POLLUTION HYDRIQUE

La structure hydrogéologique des aquifères, inégalement répartis de l'amont à l'aval, est déterminée par la nature chevauchante des nappes rifaines (D. Leblanc, 1979). La tectonique cassante et la structure même des nappes - réservoirs commandent la position et la circulation des eaux souterraines. Dans les zones de contact anormal des nappes, le Trias affleure, soit sous forme d'injections spatialement réduites (C. Pierrat, 1914, A. Jeannette, 1957 et I. Sebbag, 1957), soit sous forme de terrains étendus linéairement suivant les axes majeurs des failles (J.-C. Vidal, 1971).

4.1. La salinité des cours d'eau

Plusieurs cours d'eau salins dans les secteurs pré-rifains offrent un régime de salinité très variable. La plupart porte un nom signifiant «Salé», on compte plus de 17 cours d'eau portant le nom «Oued Mellah» dont on distingue:

- des cours d'eau à salure saisonnière, se produisant au début de l'automne à la suite du lessivage des encroûtements salins estivaux par l'eau des premières pluies. Des points de salure se manifestent même sur des affluents importants, tels que les oueds Lahmar, Lennsar et Touaouil.
- des cours d'eau à salinité pérenne, où l'eau titre en moyenne 2 mg/l (J. Margat, 1960) sur la majeure partie de leur cours et où la salure maximale se produit à la fin de la période d'été. Le long du cours du Lebène, la salure croît de l'amont à l'aval, particulièrement au massif diapirique de Tissa. La figure 8 montre la variation des concentrations du sel des eaux du Lebène de janvier à septembre 1971 en fonction des débits et par rapport au diapir. En hiver, la concentration en sel est

plus élevée à l'aval du massif, elle dépasse les 10 g/l (P₃). Alors qu'en été, la concentration est maximale au pied du massif avec des valeurs extrêmes de l'ordre de 5 g/l (P₂).

En contrebas du massif de sel de Tissa (4,2 km² de superficie) s'étalent des cônes de déjection argilo-salins et s'installent des bassins de décantation destinés à l'extraction des sels (Fig. 9). Malgré la déviation du chenal d'écoulement à l'amont du massif (1987), sur presque 2,5 km, la concentration en sodium et en chlorure demeure trop forte; elle n'a diminué que de 1,45 mg/l pour le sodium et 7 mg/l pour les chlorures. Néanmoins, en périodes de haute hydraulicité, les flux hydriques divaguent largement et empruntent les anciens chenaux. Les eaux sont donc salées et polluées et ne peuvent être utiles ni pour l'alimentation en eau potable, ni pour l'usage domestique, ni encore pour l'irrigation.

4.2. La salinité des eaux de sources

Selon les annuaires de la Direction Régionale de l'Hydraulique de Fès, il existe de nombreux points d'eau salés (sources et puits) dont les concentrations sont élevées. Les eaux issues de certaines nappes perchées sont salées. Les débits des sources, étant irréguliers, sont commandés par le régime pluviométrique et non par la circulation souterraine des eaux, puisque les nappes, au Prérif central, ne sont que rarement communicantes.

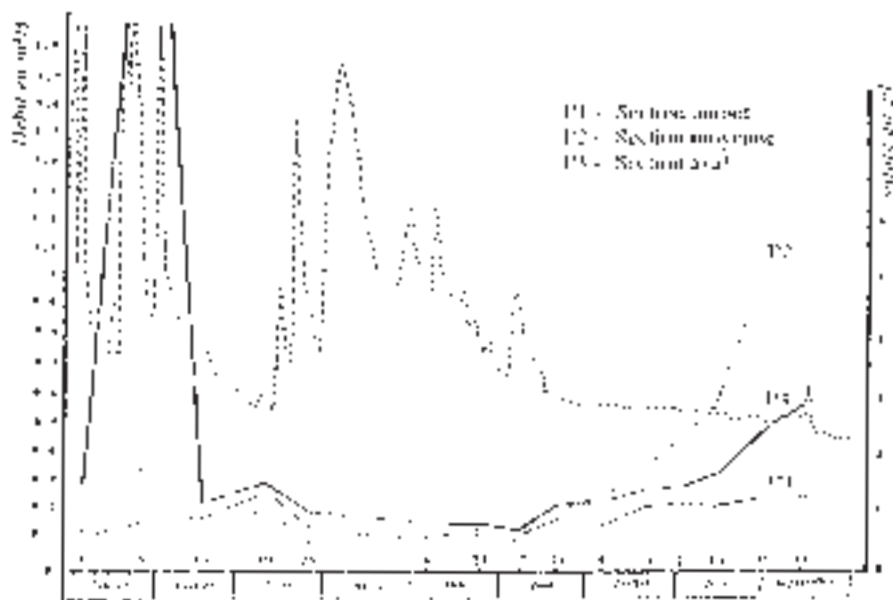


FIGURE 8. Évolution de la salinité des eaux en fonction des débits du Lebène.

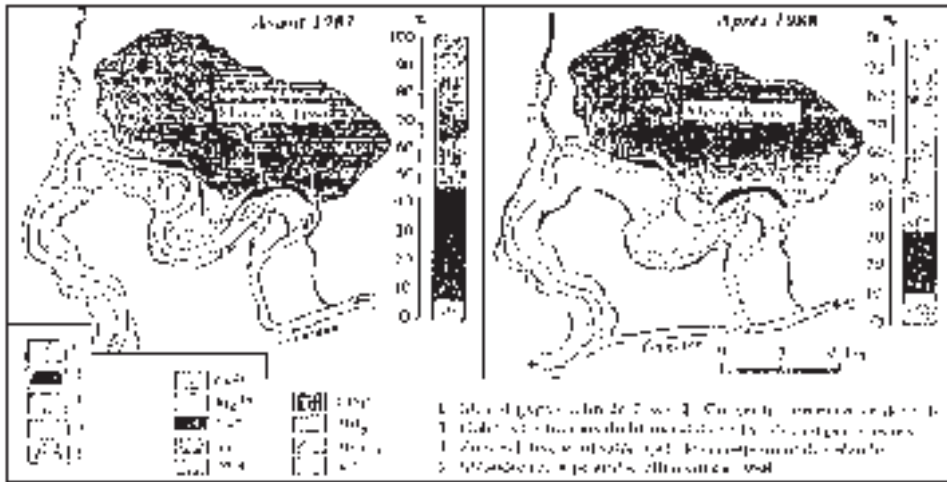


FIGURE 9. Diminution des concentrations des sels après recouplement du méandre du Lebène aux environs de Tissa.

Les sources situées dans des injections triasiques sont excessivement salées. À Sof Azeroual, la quantité des sels dissous du groupe chlorures-sodium est de 91,5 mg/l en moyenne, avec un volume de résidu sec de 135 mg/l, soit 68% en sels du total des éléments dissous. De même, à Sidi Ahmed Moul Laâmara, la moyenne des sels dissous est de 96 mg/l, les résidus secs s'élèvent à 193 mg/l, soit 50% du total.

CONCLUSION

Dans le bassin du Lebène, les taux de la dissolution varient de l'amont à l'aval. Ceci s'explique par l'existence de trois faciès hydrochimiques. Néanmoins, le caractère excessif de la dissolution spécifique des halites au massif gypso-salin de Tissa et la forte pollution hydrique posent de sérieux problèmes environnementaux. En effet, si le faciès des eaux du cours supérieur du Lebène est bicarbonaté magnésien (aquifères calcaires et dolomitiques), le faciès des eaux des cours moyen et inférieur est chloruré-sodique, dû au lessivage des terrains triasiques riches en halites. Le massif de Tissa illustre parfaitement ce phénomène. La forte concentration du groupe Sodium-Chlorure, liée à la grande solubilité du sel, donne aux eaux du Lebène une salinité primaire et une alcalinité secondaire.

De l'amont à l'aval du bassin, le tonnage exporté croît linéairement avec les débits. Le lessivage des terrains traversés, en particulier dans les secteurs où affleurent des formations gypso-salines, accroît la charge en solution et modifie la composition des eaux du Lebène et ses affluents.

Au delà de l'étude hydrochimique et de la pollution hydrique, les répercussions sur les milieux environnementaux et sur la population riveraine doivent être prises en compte dans une nouvelle approche de l'aménagement du territoire et de l'environnement. Le

recoupement du lobe de méandre du Lebène au pied du massif de Tissa en 1987 et l'action de boisement (végétation à caractère halophyte) menée à partir de 1997 ne suffisent guère pour lutter contre le phénomène de destruction du massif et de la pollution hydrique. L'exploitation de l'actuelle saline constitue une activité économique permanente. D'après les statistiques de 1998, la capacité de production annuelle s'élève à 10.850 t / an et, selon les experts, la mine de sel de Tissa représente un stock pour la consommation d'environ 400 ans. C'est pourquoi, planification urbaine, environnement, génie civil, etc... sont autant de domaines où les efforts des aménageurs- décideurs restent encore à déployer dans les zones où affleurent les formations diapiriques triasiques; et ce, dans le but d'un aménagement intégré, local et durable.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DUPOND, G., BONICHON, P. & DAGUIN, F. (1938): Quelques observations sur les montagnes de sel du Prérif (Maroc septentrional). *Notes et Mém.* n° 50, Dunod, Paris, 9 p.
- FABRE, G., HAKIM, B. & NICOD, J. (1976): Études hydrologiques et hydrochimiques sur quelques sources de Basse Provence. *Travaux E.R.A. 282 du C.N.R.S.* n° 5, Aix-en-Provence.
- FREY, R. (1933): Les analyses d'eau et leur interprétation géologique. *Notes et Mém.* n° 26, Édit. Services des Mines et de la carte Géologique, Rabat, 68 p.
- GARTET, A. (1994): *Morphogenèse et hydrologie dans le bassin versant de l'Oued Lebène, Rif méridional et Prérif central et oriental (Maroc)*. Thèse Doct. Univ. Aix-Marseille I., Aix-en-Provence, 342 p.
- GARTET, A. (1999): Violence des crues de l'Oued Lebène et évolution des lits fluviaux (Prérif central). In «Risques naturels, Publ. Comité des travaux historiques et scientifiques, 120^e Congrès, Paris, pp: 67-85.
- GARTET, J. (2001): *Contribution à la connaissance de la dynamique fluviale au Pleistocène supérieur et à l'Holocène dans la vallée de l'Ouerrha: Étude des dépôts des basses et très basses terrasses (Rif, Maroc)*. Thèse Doct. Univer. Provence, Aix-en-Provence, 543 p.
- HAKIM, B. (1984): Nouvelle approche pour l'évaluation de la dissolution spécifique. *Rev. Karstologia* n° 3, 56 p.
- JEANNETTE, A. (1957): Rapport préliminaire de visite aux salines de Zaklit. *Notes de terrain, Rapport inédit, S.R.G. n° 50 Dir. Mines Géol. Div. Géol. Rég. Meknès.*
- LE BLANC, D. (1979): Étude géologique du Rif externe oriental au nord de Taza (Maroc). *Notes et Mém. Serv. Géol.* n° 281, Rabat, 160 p.
- MARGAT, J. (1960): Répartition des eaux salées au Maroc. Atlas du Maroc. Sect. V, Hydrol. continent. Hydrogéol. *Comité Géogr. Maroc*, Rabat, Planche n°14 b et notice explicative, 20 p.
- NICOD, J. (1973): Relation débit — teneur et débit — érosion dans les karsts méditerranéens. VI^{ème} Congrès International de Spéléologie, Oloumouc.
- NICOD, J. (1976): Karsts des gypses et des évaporites associés. *Ann. Géogr.* n° 471, T. LXXXV, Paris, pp. 513-554.

- NICOD, J. (1993): Recherches nouvelles sur les karsts des gypses et des évaporites associées; seconde partie: géomorphologie, hydrologie et impact anthropique. *Rev. karstologia* n° 20, pp. 15-30.
- NICOD, J. (2000): Ras-El-Aïn (Syrie N) et le problème des sources karstiques artésiennes aux marges ou à l'intérieur des domaines arides. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.* n° 2-2000, Paris, pp. 189-199.
- PETIT, E. & ERPICUM, M. (1987): Variations de la température des eaux de sources et de leurs débits en fonction de leur mode d'alimentation. *Bull. Soc. Géol. de Liège*, n° XXII, 22-23ème années, 1986-1987, pp. 161-172.
- PIERRAT, C. (1914): Étude sur le rocher de sel de Tissa. *Bull. Soc. Topogr. France.*, 38è année, mars - avril n° 2, Paris, pp. 63-68.
- SEBBAG, I. (1957): Compte-rendu de mission: Indice de pyrite d'Outa-Bouâbane, région de Tissa. Rapport inédit, S.R.G. n° 50, *Dir. Mines Géol. Div. Géol. Rég. Meknès*.
- VIDAL, J.-C. (1971): Une interprétation nouvelle des nappes du Prérif central (Maroc) et ses conséquences sur la structure de leur substratum autochtone. *C.R. Acad. Sc. T. 272*, série D, pp. 24-27, Paris.
- VIDAL, J.-C. (1984): Carte géologique du Rif au 1/ 50 000è et notice explicative. Feuille de Beni-Frassène. *Notes et mém. Serv. Géolog. Maroc* n° 283 bis, 39 p., Rabat.

