

Zonation hydrogéochimique verticale dans l'aquifère karstique du Cid (Alicante, Espagne)

Hydrogeochemical vertical zonality in the Cid karst aquifer (Alicante, Spain)

Antonio PULIDO-BOSCH¹, José Miguel ANDREU², Antonio ESTÉVEZ² et Juan AYANZ²

¹ Département d'hydrogéologie, université d'Almeria, 04120 La Cañada (Almeria), Espagne

² Département de sciences de la Terre et de l'Environnement, université d'Alicante, Espagne

ABSTRACT

Study of hydrochemical data, conductivity and temperature logs and the samples taken at different depths reveals a marked hydrogeochemical vertical zonality in the Cid karst aquifer. Most saline waters lie in the deepest parts of the aquifer, while those of lowest mineralization occupy the areas of the saturated zone closest to the surface. The hydrodynamic system thus formed is considered to be influenced by two flows: a more superficial one, presenting a lower level of water mineralization; and a deep flow system in which the water, due to contact with Triassic evaporitic materials, experiences a considerable increase in mineralization. © Académie des sciences / Elsevier, Paris.

Keywords: Overexploitation, Karst aquifer, Flow systems, Evaporites

RÉSUMÉ

L'étude des analyses hydrochimiques, des diagraphies de conductivité et de température de l'eau, et des échantillons d'eau pris à la verticale ont mis en évidence l'existence, dans l'aquifère karstique du Cid, d'une zonation hydrochimique verticale. Les eaux les plus salines se trouvent dans les parties les plus profondes de l'aquifère, tandis que celles à minéralisation plus faible occupent les parties les plus superficielles de la zone saturée. On en déduit que le régime hydrodynamique de cet aquifère comprend deux systèmes d'écoulement : un système superficiel dans lequel la minéralisation des eaux est plus faible, et un système d'écoulement profond qui, au contact avec des matériaux évaporitiques triasiques, acquiert une minéralisation beaucoup plus importante. © Académie des sciences / Elsevier, Paris.

Mots clés : Surexploitation, Aquifère karstique, Systèmes d'écoulement, Évaporites

ABRIDGED VERSION

Geological framework

A study was made of the Cid aquifer with the aim of establishing the significance of the vertical hydrochemical variations in this type of system. This is a case of water mining over a period of more than 20 years. The Cid aquifer (figure 1) occupies an area of over 30 km² in the central part of the province of Alicante. The oldest parts of the aquifer are Triassic clays and

evaporitic materials. The series begins by marls and limestone-marls, with thicknesses sometimes exceeding 300 m. It belongs to the Lower Cretaceous and comprises the impervious substratum of the aquifer. Over this lie some 200 m of Albian limestones, which are covered by micritic limestones and limestone-marls. The thickness of this member exceeds 100 m and it belongs to the Lower Cenomanian–Upper Albian. The Cretaceous series ends with marly limestones of the Senonian,

Note présentée par Georges Pédro.

Note remise le 26 novembre 1997, acceptée après révision le 2 février 1998.

with a thickness of over 50 m. Unconformed outcrops of calcarenites also exist alternating with marls belonging to the Tertiary. Finally, in the surrounding area, there are Plio-Quaternary detrital materials.

Methodology and results

Work methods used to attain the characterization of the potential hydrogeochemical vertical zonality, included the study of hydrogeochemical data over time, geophysical logs and water samples from different depths into the wells. Exploitation of the system commenced in the late 1960s. The depletion of the piezometric level during the period 1960–1983 was between 230 and 250 m (figure 2).

Because of the reduction in pumping amount, the rise in water level started, with a mean rate of $19 \text{ m}\cdot\text{yr}^{-1}$. This increase coincided with a period of abundant rainfall, exceeding 700 mm while the annual mean is just 350 mm. In recent years the rate of recovery has declined and, because of the drought, there have even been slight falls in water levels. Nevertheless, at present the system is in balance.

The earliest data available on the chemistry of the waters were published in 1975, when the aquifer was subject to a high degree of overexploitation. The hydrochemical facies then prevailing was sodic chloride. Table I presents conductivity values showing how the chemistry of the water in the aquifer has evolved. The initial data show that while there existed cases of a moderate degree of salinity (No 6), others presented high ionic concentrations (No 7). As the increase in salinity is mainly derived from sodium chloride, its origin is attributed to the dissolution of evaporites from within the Triassic materials. Thus the water that flows through these materials dissolves the salts, while the water that flows through carbonate materials is subject to a lesser saline influence. In accordance with this water-circulation model, and depending on the siting and depth of each well, the quality of water extracted is a result of the mixture of flows of different origin.

Figure 3 shows the logs of temperature and electrical conductivity obtained from the four well-logging. As the depth of effective obtention for logging was limited, it was not always possible to reach the lower levels of the aquifer. At point No 1,

only the first 53 m of the saturated zone could be tested. The well-log of this sampling shows appreciable changes in conductivity, indicating variations in water salinity in depth. Detailed analysis revealed various sectors in which rises in conductivity of up to $900 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ between the initial and final stages were recorded. The same pattern was observed in the log for well No 2, in which after a superficial band from the piezometric level to a depth of 300 m, with conductivities of $1\,500\text{--}1\,600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, there are then marked variations in conductivity between 301–302 m and 310–314 m, with figures of up to $2\,600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. From a depth of 325 to 385 m, conductivity rises continuously, with a gradient of about $80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$. At the latter depth, conductivity is around $7\,400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ and remains so till the depth of 400 m, the limit of the test.

Mineralization of the waters is mainly a result of the increase in chloride and sodium ions. Concentrations of calcium, magnesium, potassium and sulphate ions also increase, though to a lesser degree. The $(\text{Cl} + \text{SO}_4)/\text{HCO}_3$ ratio (in $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$; table II) increases constantly, indicating a predominance of the solution of evaporitic salts. This is probably related to the presence, at these depths, of Triassic materials of the Keuper facies.

Discussion

The joint study of these vertical logging results and the evolution of water chemistry over time reveal the existence of hydrochemical vertical zonality. This might be related to the existence of two flow systems, according to the model proposed by Tóth (1963), in which a local flow system becomes established in the shallower parts of the aquifer, with a predominance of waters of low to medium salinity and a conductivity of around $1\,500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Most superficial extractions are from this system. In addition, there is a deep flow system, probably intermediate or regional, comprising waters with a mineralization of about $7\,000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. The high saline content of this flow would result from the circulation of water through Keuper materials, either occurring at areas forming the substratum or the edges of the aquifer. This circulation model with deep-level saline enrichment has also been described in other karstic aquifers (Worthington and Ford, 1995).

1. Introduction

Les aquifères karstiques montrent une composition lithologique relativement continue et homogène, raison pour laquelle on peut penser que l'eau qui y est contenue présenterait une grande uniformité. Ainsi, la différenciation possible, en fonction de la minéralisation de l'eau, devrait être peu remarquable. Afin d'établir l'importance des variations hydrochimiques verticales dans ce type de systèmes, on a étudié l'aquifère du Cid. Il s'agit d'un exemple de site ayant donné lieu au cours des 20 dernières années à une exploitation de l'eau. Ce travail a pour

but d'établir l'influence des pompages sur la minéralisation des eaux, et de déduire dans quelle mesure il s'est produit (à moins qu'elle ne pré-existât ?) une différenciation hydrogéochimique verticale.

L'aquifère du Cid (figure 1) est un relief occupant plus de 30 km^2 , situé dans la partie centrale de la province d'Alicante. Du point de vue géologique, la Sierra du Cid se trouve dans le domaine Prébétique des Cordillères Bétiques (Sud-Est de l'Espagne). Les matériaux les plus anciens de la zone sont des argiles et des roches évaporitiques triasiques, qui affleurent en bordant le relief. La série que présente l'Unité de la Sierra du Cid, étudiée par Leclerc et

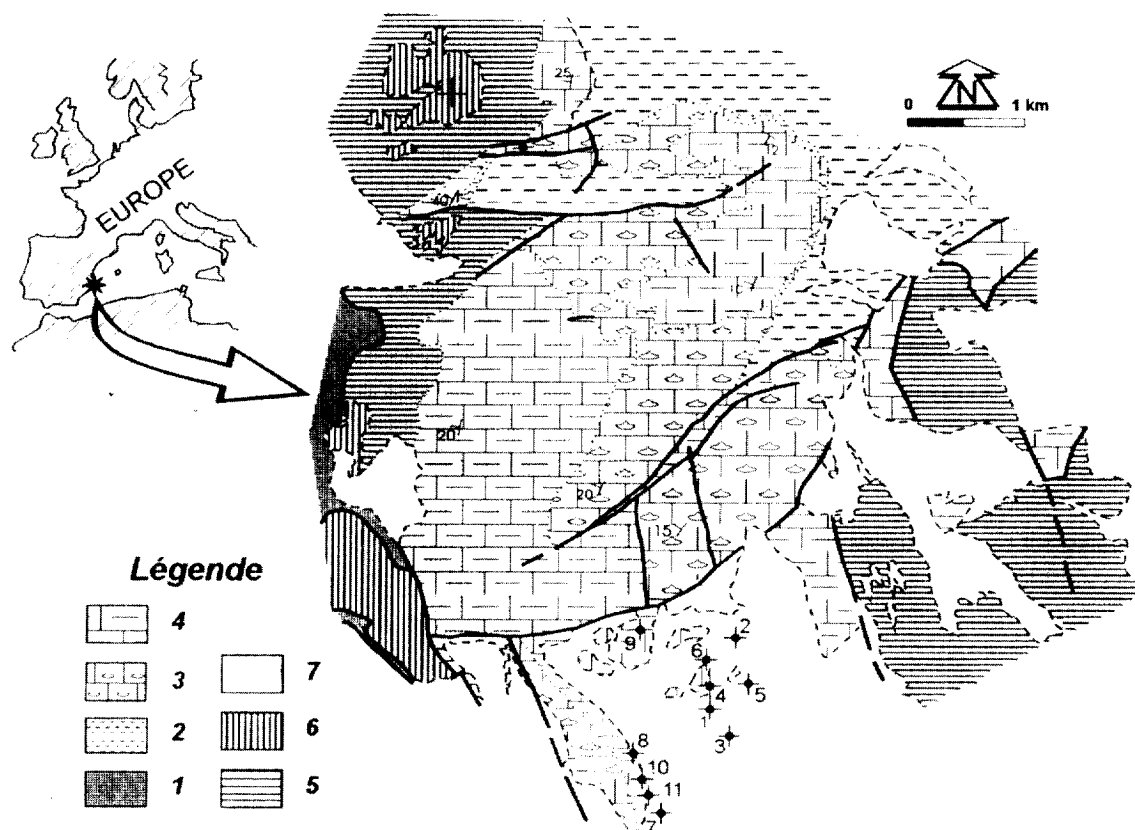


Figure 1. Localisation de la zone étudiée et schéma hydrogéologique de la Sierra del Cid, où se trouvent les forages cités dans le texte. 1 : Keuper ; 2 : marnes crétaées ; 3 : calcaires albiens ; 4 : calcaires et calcaires marneux de l'Albien-Cénomanien ; 5 : marno-calcaire du Sénonien ; 6 : calcarénites et marnes du Tertiaire ; 7 : matériaux plio-quaternaires.

Location of the study area and hydrogeological scheme of Sierra del Cid, site of the wells mentioned in the text. 1: Keuper; 2: Cretaceous marls; 3: Albian limestones; 4: limestones and marly limestone (Albian-Cenomanian); 5: Senonian marly limestones; 6: Tertiary calcarenites and marls; 7: Plio-Quaternary materials.

Azéma (1977), commence par un niveau de marnes et de marnocalcaires, qui peuvent atteindre des puissances supérieures à 300 m. L'âge de cet ensemble correspond au Crétacé inférieur, et constitue l'imperméable de base de l'aquifère du Cid. Sur celui-ci se trouvent environ 200 m de calcaires de l'Albien, qui supportent un niveau de calcaires, calcaires marneux et marno-calcaires. Ce niveau peut dépasser 100 m, et son âge est Albien supérieur-Cénomanien inférieur. La série crétaée se termine par des marno-calcaires et des calcaires marneux du Sénonien, dont la puissance dépasse 50 m. Des calcarénites à alternances de marnes correspondant au Tertiaire affleurent également, en discordance, aux alentours du Cid. Finalement, dans les parties les plus déprimées, on trouve des matériaux détritiques plio-quaternaires.

Du point de vue tectonique, la Sierra du Cid est une série monoclinale s'inclinant vers l'ouest, qui forme une partie de l'unité prébétique Cid-Ventós, chevauchant sur des matériaux prébétiques tertiaires. Les failles les plus importantes sont celles de composante ESE-WNW, qui enfoncent les matériaux calcaires vers le sud. De plus, il en existe d'autres, de composante nord-sud, qui provoquent un réajustement de la structure, donnant lieu à une structure en touches de piano (Azéma, 1977).

2. Méthodologie

La méthodologie observée pour atteindre les objectifs proposés a été la suivante : utilisation des données hydrogéochimiques dans le temps, réalisation de diagraphies géophysiques et échantillonnage direct d'eau à différentes profondeurs. Dans le cas d'aquifères surexploités, l'étude analytique, à différents moments, apporte des informations sur les caractéristiques de l'eau à différentes profondeurs d'extraction. Cependant, l'un des plus grands inconvénients de cette méthode est habituellement un manque d'information historique fiable.

La réalisation de diagraphies de conductivité électrique et de température de l'eau dans des forages permet de constater indirectement la présence de niveaux d'eau à différentes minéralisations, et de situer des niveaux présentant une circulation d'eau, contribuant ainsi à la connaissance de l'hydrodynamique du système. Dans le cas de l'aquifère du Cid, quatre diagraphies ont été réalisées. Les sondes utilisées sont de fabrication Geolog Robertson Research et Century Geophysical Corporation. La prise d'eau à différentes profondeurs dans les forages est plus concluante. Dans ce cas, un hydrocapteur Rutter de 500 cm³ de capacité a été utilisé.

3. Comportement hydrodynamique

L'exploitation de ce système a commencé vers 1969. Les rabattements de niveau durant la période 1969–1974 ont atteint 60 m, ce qui équivaut à une baisse du niveau piézométrique de $12 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$. Cette situation correspond à un régime de forts pompages, qui en 1974 ont atteint 24 hm^3 , face à des entrées estimées entre 2 et $3 \text{ hm}^3\cdot\text{an}^{-1}$ (Andreu, 1997). À partir de 1975 (figure 2), le niveau piézométrique baisse fortement, les plus grands rabattements s'étant produits en 1976, avec plus de 30 m. Le régime de surexploitation s'est maintenu jusqu'à 1983. Les rabattements survenus dans quelques secteurs pour la période 1975–1983 étaient compris entre 170 et 190 m, ce qui, s'ajoutant aux 60 m antérieurs à 1975, permet de supposer un rabattement du niveau phréatique de 230 à 250 m en 14 ans environ.

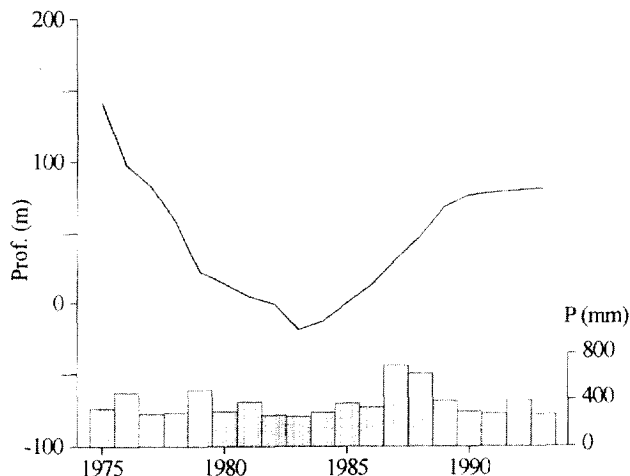


Figure 2. Évolution piézométrique de l'aquifère du Cid.

Piezometric evolution of El Cid aquifer.

Après 1975, les pompages ont diminué. On peut souligner qu'en 1977, 55 % des forages effectués dans cet aquifère au début de l'exploitation avaient été abandonnés, soit parce qu'il n'y avait plus d'eau, soit en raison des problèmes posés par l'introduction de pompes à de telles profondeurs, ou encore — et surtout — du fait de la détérioration de la qualité chimique de leurs eaux (Pulido-Bosch, 1988). En 1984, les pompages étaient donc inférieurs aux entrées, et une période de remontée du niveau piézométrique a commencé. Celui-ci a atteint environ 115 m, à raison d'en moyenne $19 \text{ m}\cdot\text{an}^{-1}$. Il faut tenir compte du fait que cette période a été relativement humide, avec des précipitations supérieures à 700 mm, alors que la moyenne annuelle dans cette région ne dépasse pas 350 mm. Actuellement, ce système se trouve proche de l'équilibre, avec des sorties sensiblement identiques aux entrées.

4. Évolution hydrochimique

La méconnaissance de l'existence de sources en relation avec ce système empêche d'avoir des références historiques antérieures à l'exploitation quant à la minéralisation de leurs eaux. Les premières données concernant le chimisme sont postérieures à 1975, année où l'aquifère était déjà surexploité. Le faciès hydrochimique qu'il présente à cette date était chloruré sodique, bien que la minéralisation fût inférieure aux déterminations effectuées postérieurement.

Le tableau I indique quelques valeurs de conductivité qui reflètent l'évolution du chimisme des eaux de cet aquifère. Les résultats les plus anciens montrent des eaux de salinité moyenne (n° 6), et d'autres qui présentaient déjà des concentrations ioniques élevées (n° 7). Ce qui signifie que l'emplacement et la profondeur des forages a exercé une influence remarquable sur la minéralisation des eaux pompées. Cette situation est possible si l'on accepte l'existence de plusieurs systèmes d'écoulement dans l'aquifère. Étant donné que l'augmentation de la salinité est due essentiellement au chlorure de sodium, on attribue l'origine de ce phénomène à la dissolution des évaporites qui existent dans les matériaux triasiques. Ainsi, l'eau qui trouve ces terrains sur son passage dissout ces sels, tandis que celle qui circule à travers des matériaux carbonatés présente une salinité inférieure. Suivant ce modèle de circulation, dépendant de l'emplacement et de la profondeur de chaque forage, on obtient une qualité d'eau qui résulte du mélange d'écoulements d'origines différentes.

Tableau I. Contrôle historique de la conductivité de quelques points d'eau.

Record over time of some monitoring points.

Point	Année	C ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
n° 8	1979	1 850
n° 8	1992	3 915
n° 7	1977	3 625
n° 10	1980	2 100
n° 10	1983	5 900
n° 11	1975	1 400
n° 11	1979	2 800
n° 11	1980	2 200
n° 11	1981	2 000
n° 11	1982	2 650
n° 11	1982	2 300
n° 11	1983	3 000
n° 9	1990	1 750
n° 9	1991	2 850
n° 6	1977	1 300

Mais on constate également que, lorsque l'on analyse les variations du chimisme au cours du temps, il existe des forages dans lesquels la concentration ionique des eaux

augmente, ce qui revient à mettre en évidence un certain degré d'enrichissement salin, à mesure qu'augmente la surexploitation. Ce phénomène a été signalé dans d'autres aquifères à caractéristiques similaires (Pulido-Bosch et al., 1996).

5. Variations hydrochimiques verticales

La figure 3 donne les diagraphies de conductivité électrique et de température des quatre forages. Étant donné que la profondeur utile des forages pour effectuer les diagraphies était faible, les parties inférieures de l'aquifère n'ont pas toujours pu être atteintes. Cependant, la diagraphie du forage n° 2 est un exemple représentatif des forages les plus profonds de l'aquifère. Les forages 3 et 4, qui présentent seulement des données correspondant aux premiers mètres de la zone saturée, se caractérisent par le fait que la conductivité reste assez stable. Cependant, les valeurs qu'ils montrent varient de 1 600 à 3 300 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, selon le niveau analysé.

Les 53 premiers mètres de zone saturée ont également pu être mesurés. Contrairement aux exemples précédents, la diagraphie de ce forage reflète des changements remarquables de la conductivité, qui mettent en évidence des variations de la salinité de l'eau le long de la colonne. On note, dans ce forage, une disposition de l'eau moins minéralisée dans la partie haute de la colonne, tandis que les eaux à salinité plus élevée se situent dans la partie plus profonde. Entre elles existe une zone de transition ou mélange qui présente un gradient positif très élevé. La valeur moyenne de celui-ci est de 25 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

Le même comportement est observé dans la diagraphie du forage n° 2. On peut remarquer sur celle-ci, après une zone superficielle depuis le niveau piézométrique jusqu'à

300 m — les conductivités γ sont d'environ 1 500–1 600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ —, des sauts significatifs de conductivité se produisant entre 301–302 et 310–314 m, et qui peuvent atteindre 2 600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. À partir de 325 m, la conductivité commence à augmenter de façon continue jusqu'à 385 m, avec un gradient d'environ 80 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$. Lorsqu'elle atteint cette profondeur, la conductivité atteint environ 7 400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, et conserve cette valeur jusqu'à 400 m, niveau où se termine la diagraphie.

Les résultats de quelques paramètres analytiques (tableau II) mettent en évidence une augmentation de la minéralisation de l'eau dans les forages qui dépassent 350 m de profondeur, tandis que celle-ci varie très peu ailleurs. Ceci coïncide avec les données obtenues à partir des diagraphies, et confirme l'existence d'une zone supérieure d'eau moins minéralisée, située sur une autre à salinité élevée.

La minéralisation des eaux se produit principalement par l'augmentation des teneurs en ions chlorure et sodium. Les concentrations des ions calcium, magnésium, potassium et sulfates augmentent également, bien que de façon bien moindre. La relation $(r_{\text{Cl}} + r_{\text{SO}_4})/r_{\text{HCO}_3}$ (tableau II) est de plus en plus élevée, probablement en raison de la présence en profondeur de matériaux triasiques de faciès Keuper. Le rapport $r_{\text{SO}_4}/r_{\text{Cl}}$ décroît, ce qui indique une augmentation, en profondeur, de l'influence des chlorures par rapport à celle des sulfates.

6. Discussion

L'étude conjointe des diagraphies, de l'échantillonnage à la verticale, ainsi que de l'évolution de l'eau au cours du temps permet de constater l'existence d'une zonation

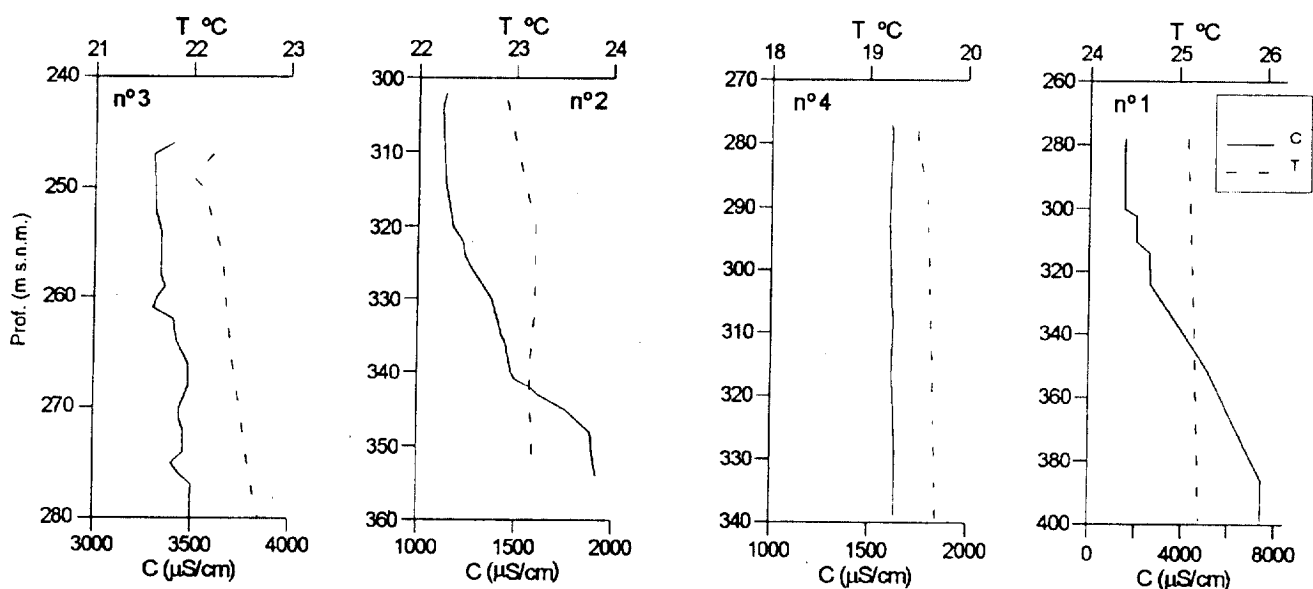


Figure 3. Variations de la conductivité et de la température avec la profondeur.

Variations of conductivity and temperature with depth.

Tableau II. Déterminations analytiques de l'échantillonnage selon la verticale et valeurs de quelques relations ioniques (meq·L⁻¹). Profondeur en m ; conductivité en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; ions en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. a : $(\text{Cl} + \text{SO}_4)/\text{HCO}_3$; b : SO_4/Cl .

Analytical determinations from vertical sampling and values of some ionic relations ($\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$). Depth in m; C: electrical conductivity in $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; ions in $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; a: $(\text{Cl} + \text{SO}_4)/\text{HCO}_3$; b: SO_4/Cl .

N°	Prof.	C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃	Cl	SO ₄ ²⁻	Sr ²⁺	a	b
n° 1	380	6 070	224	105	861	15	149	1 635	374	—	22,04	0,17
	385	6 020	319	147	902	10,2	222	1 834	261	10,8	15,69	0,11
	390	6 810	313	153	1 010	14,1	197	2 165	458	—	21,84	0,16
	410	7 530	368	185	1 231	11,8	223	2 343	457	11,9	20,66	0,14
n° 2	320	1 325	91	49	169	4,8	162	349	122	2,4	4,66	0,26
	360	1 661	131	61	197	5	169	475	135	3,4	5,85	0,21
	405	4 600	244	120	636	8,7	232	1 457	348	8,7	12,70	0,18
n° 3	260	2 590	119	80	476	9,25	320	633	389	5,2	4,94	0,45
	350	2 560	147	80	382	13	313	618	400	5,9	5,02	0,48
n° 4	300	1 632	146	55	192	9,7	154	393	325	3,2	7,07	0,61
	330	1 625	152	55	185	7,7	155	342	301	3,1	6,25	0,65
n° 5	300	1 768	69	47	302	8	198	407	297	1,9	5,44	0,54
	350	4 340	333	147	661	7,7	241	1 562	383	8,2	13,16	0,18
	400	5 980	401	190	950	10,5	174	2 254	393	9,5	25,13	0,13

hydrochimique à la verticale. La zonation pourrait être en rapport avec l'existence de deux systèmes d'écoulement, suivant le modèle proposé par Tóth (1963). Un système d'écoulement local serait ainsi établi dans les parties les plus superficielles de l'aquifère, avec prédominance d'eaux de salinité faible ou moyenne et de conductivité d'environ $1\,500\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La plus grande partie des forages de faible profondeur atteint ce système. Il existerait en outre un système d'écoulement profond, probablement

intermédiaire ou régional, constitué par des eaux à minéralisations d'environ $7\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La teneur élevée en sels de cet écoulement profond serait due à la circulation de l'eau à travers les matériaux du Keuper, soit parce que ceux-ci se trouvent à la base de l'aquifère, soit parce qu'ils sont localisés aux abords de cette dernière. Ce modèle de circulation, avec enrichissement salin en profondeur, a été également décrit dans d'autres aquifères karstiques (Worthington et Ford, 1995).

Remerciements. Nous désirons remercier les propriétaires des forages Santiago Navarro et Comunidad de Regantes de Monforte del Cid pour nous avoir facilité la réalisation de ce travail. La recherche a été effectuée dans le cadre des projets AMB92-0211 et AMB95-0493, financés par la CICYT (A.P.B. et J.M.A.).

RÉFÉRENCES

- Andreu J.M. 1997. Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid y Cabeçò d'Or (provincia de Alicante), *Tesis Doct.*, Univ. Alicante, 377 p.
- Azema J. 1977. Étude géologique des zones externes des Carrières bétiques aux confins des provinces d'Alicante et de Murcie (Espagne), *Thèse*, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris, 395 p.
- Leclerc J. et Azema J. 1976. Le Crétacé dans la région d'Agost, Province d'Alicante, Espagne, et ses accidents sédimentaires, *Cuad. Geol. Univ. Granada*, 7, 35-51
- Pulido-Bosch A. 1988. La surexploitation de certains aquifères karstiques d'Alicante (Est de l'Espagne), *Bull. Centre Hydrol. Univ. Neuchâtel*, 8, 49-60
- Pulido-Bosch A., Morell I. et Andreu J.M. 1996. Modifications hydrogéochimiques provoquées par la surexploitation d'un aquifère karstique, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 323, série IIA, 313-318
- Tóth J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, *J. Geophys. Res.*, 68, 4795-4812
- Worthington S.R.H. et Ford D.C. 1995. High sulfate concentration in limestone springs: an important factor in conduit initiation?, *Environ. Geol.*, 25, 9-15