

IDENTIFICATION HYDROGÉOCHIMIQUE DU KARST HYDROTHERMAL CONSTANTINOIS (ALGÉRIE NORD-ORIENTALE)

Reçu le 03/07/2004 – Accepté le 31/12/2004

Résumé

La formation carbonatée jurassico-crétacée du Constantinois a été soumise à une fracturation intense depuis le Mésozoïque. Ce dispositif structural a eu pour conséquence hydrogéologique, un grand nombre de sources thermales autour de Constantine, parfois, avec un débit très élevé, tel que l'Ain Zouaoui (800 l/s) à Hamma Bouziane, constituant la décharge d'un aquifère karstique complexe.

Les nombreuses fractures ouvertes des affleurements carbonatés conséquentes à la tectonique Plio-Quaternaire, constituent en apparence la seule modalité de recharge de l'aquifère (infiltration des eaux météoriques et pertes des cours d'eau Rhumel et Bou Merzoug). Toutefois, la composition sablo-argileuse des dépôts de la couverture néogène, jusque là considérés comme imperméables, participent à la recharge de l'aquifère. La mauvaise corrélation obtenue, entre les espèces alcalines et les chlorures, dosées dans les prélèvements d'eaux de sources et de forages, porte à croire, en effet à une participation de recharge de l'aquifère par les eaux qui circulent dans la formation néogène. Cet état de fait, signifie que les dépôts néogènes formeraient avec les carbonates une zone d'infiltration ponctuelle du système karstique, et un système aquifère partiellement captif. Par ailleurs, les données isotopiques obtenues du carbone 13 et de l'oxygène 18 pour le CO₂ et H₂O et les données fournies par les équilibres calco-carboniques, ont révélé un mélange d'eaux de recharge et hydrothermales profondes avant l'émergence.

Grâce au contexte géologique et aux informations obtenues des données hydrogéochimiques, nous disposons désormais, d'indications nouvelles sur le fonctionnement du système aquifère.

Mots clés: karst, aquifère, thermalisme, hydrogéochimie, isotopes, Constantine, Algérie.

Abstract

The hydrothermal karstic of Constantine is the effect of an intense fracturation in the limestone formation since the Mesozoic. The great number of the thermal springs, belonging Hamma Bouziane (Constantine), at times, with a very high flow rate such as Ain Zouaoui (800 l/s in Hamma Bouziane), constitute the outlet of the open complex aquifer karstic.

The fracturation (regenerated in the field of the active tectonic distortion in Plio-Quaternary) of the made flushing carbonated Jurassic and cretaceous are in appearance the only way to supply the aquifer (infiltration of rainwater and loss of Rhumel and Bou Merzoug). However the results of the chemical analysis, carried out on some samples of water, have furnished signs (low correlation between Na and Cl species) which showed circulation of waters inside a neogen formation of sedimentation according the continental lagoon. This situation means that neogen deposits would make up with carbonate, an infiltration zone of the karstic system and also an aquifer system, which is partially captive. The isotopic data obtained with carbon 13, oxygen 18 and those furnished by calco-carbonic equilibriums, have revealed a mixture of waters coming from infiltration and also from deep hydrothermal, before the emergence. Thus, owing to elements supplied by hydro geochemistry, one has set up a complement of information on the process of aquifer system.

Keywords: Karst, aquifer, thermal, water geochemistry, isotopic, Constantine, Algeria.

M. DJEBBAR^{1,2},
M. BENCHEIKH-LEHOCINE²,
M. BAKALOWICZ³,
A.H. MENIAI²

¹Faculté des Sciences de la Terre
et de l'aménagement du territoire
Département de Géologie
Université Mentouri
Constantine (Algérie)

²Faculté des Sciences de l'ingénieur
Laboratoire de l'Ingénierie des procédés
de l'environnement, LIPE
Département de Chimie Industrielle
Université Mentouri
Constantine (Algérie)

³Maison des Sciences de l'Eau
Laboratoire Hydrosciences
Université Montpellier 2-cc57
Place Eugène Bataillon
34095 Montpellier cedex 5 (France)

ملخص

يعتبر المركب الكارستي لقسنطينة (حامة بوزيان) نتيجة لوصول مياه معدنية عميقة مشبعة CO₂ تصل هذه عبر شبكة من التشققات والتصدعات حيث تعبر عن مدى تأثير الحركة التكوينية التباعدية على السلاسل الكلسية القسنطينية منذ الزمن الثالث إلى بداية الزمن الرابع. وتشكل العيون الانبثاقية أحسن مثال عن هذا التأثير ومنها عين زواوي بصيب يصل إلى 800 ل/ثا وما زاد من أهمية هذا المركب وجود تكوينات غير متجانسة نيوجينية من الطين، الرمل والكلس البحيري أعطت لهذا المركب سيولة خاصة به.

الكلمات المفتاحية: الكارست، منابع للمياه الساخنة، كيمياء المياه، قسنطينة، الجزائر.

Les quelques travaux hydrogéologiques [1-4] qui se sont intéressés aux nombreuses émergences thermales à Hamma Bouziane, ont toujours considéré que toutes ces sources, quelles qu'en soient les conditions géologiques, sont la décharge d'eaux infiltrées dans les roches carbonatées qui affleurent au rocher de Constantine, dans les massifs septentrionaux voisins de Kheneg, Kellal, Salah, chettabah, et dans les massifs méridionaux de l'Oum Settas, Sekkoum, Ouled Sellem, jusqu'aux monts d'Ain Mlila. Cette formation carbonatée constituerait ainsi une unique et vaste aquifère régional. Toutefois, des travaux de terrains et une analyse structurale détaillée des formations de couverture des carbonates nous on conduit à considérer que la couverture mio-pliocène devait jouer un rôle important dans l'alimentation de ce vaste système hydrothermal. En effet, cette couverture néogène à sédimentation continentale, essentiellement conglomératique, reposant fréquemment directement sur la formation carbonatée sur de grandes superficies, est très favorable à des circulations d'eau souterraine.

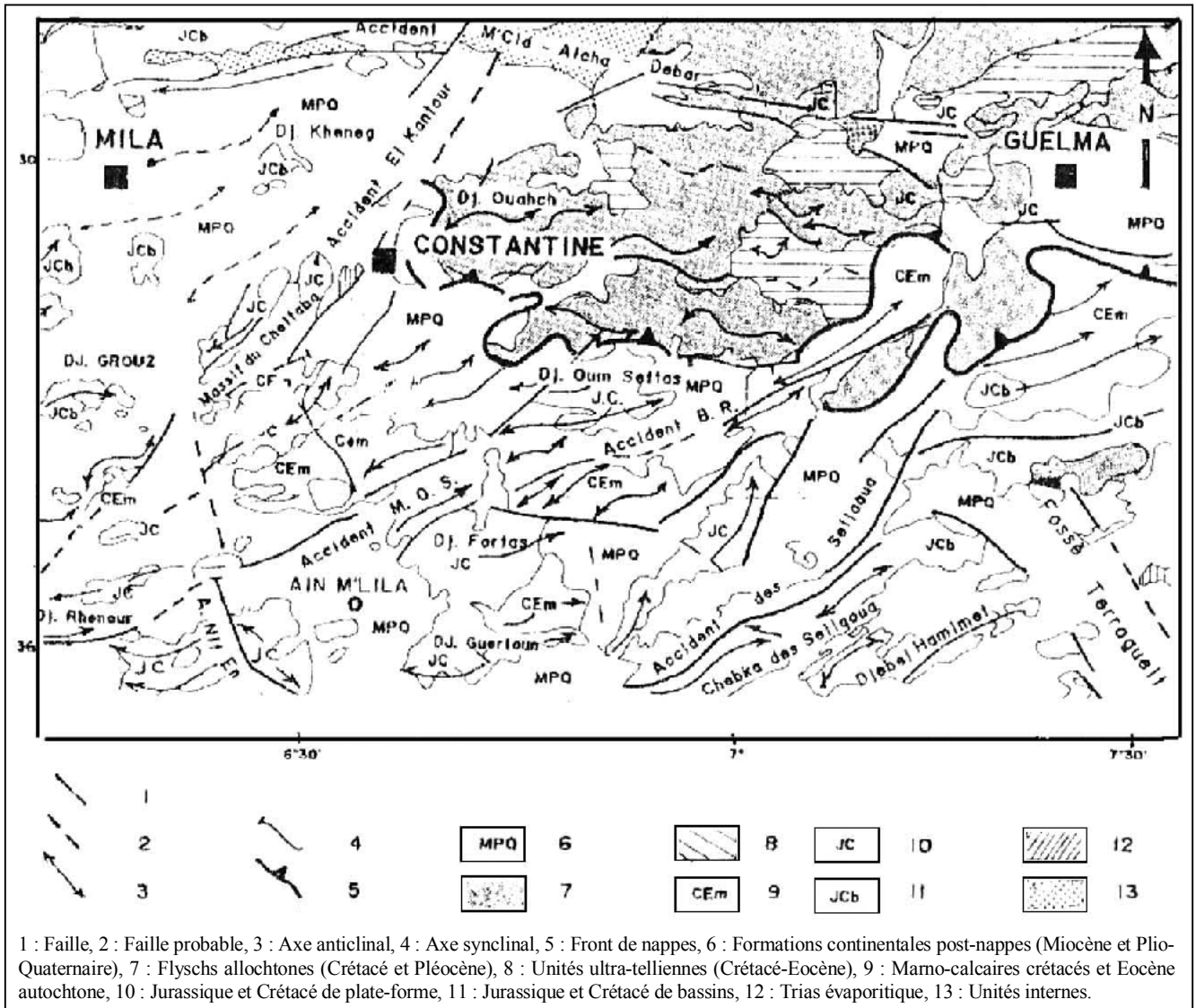


Figure 1: Environnement géologique du Constantinois septentrional (D'après la Carte Géologique de Constantine, 1/200.000, J.M. VILA, 1977, et le Cadre structural du Constantinois, 1/400.000, Y. ARRIS, 1994).

ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

Le constantinois compte un ensemble de séries carbonatées jurassico-crétacé et la couverture néogène continentale à composition hétérogène. La succession des phases tectoniques depuis le Secondaire, a affecté les dépôts mésozoïques, et conditionné les dépôts tertiaires (Fig 1). Parmi les nombreux travaux géologiques portés sur cette région, seuls les plus récents et les plus complets sont cités ici.

Lithologie

Les séries stratigraphiques de la région [5] sont constituées de sédiments datant du Trias au Mio-Plio-Quaternaire:

- Les sédiments mésozoïques constituent un ensemble carbonaté de plate-forme d'âge Jurassico-crétacé. Le Jurassique est surtout dolomitique, alors que le Crétacé inférieur est calcaire jusqu'à l'Albien. De l'Albien au Maestrichtien, les intercalations marneuses de faible

puissance dans les calcaires deviennent de plus en plus nombreuses. A leur base, des argiles versicolores à gypse du Trias jalonnent les contacts anormaux qui limitent les carbonates. L'émersion progressive de la plate-forme carbonatée au cours du Crétacé supérieur est responsable de la mise en place des dépôts continentaux tertiaires.

- Les sédiments tertiaires constituent un ensemble complexe d'origines tectoniques diverses recouvrant le substratum carbonaté. Au Dano-Paléocène, la sédimentation est marneuse de faible épaisseur ; ces marnes appartiennent au Tellien charrié sur les calcaires néritiques. L'éocène inférieur et moyen remanie le Crétacé supérieur ; il contient des blocs calcaires, parfois à silex, de taille moyenne, de l'ordre du mètre, mêlés à des galets jointifs et des graviers. A l'Eocène supérieur, au Priabonien, les sédiments sont composés de blocs calcaires à silex emballés dans des marnes schisteuses noires de l'Eocène basal. Les sédiments d'âge Eocène du constantinois sont une unité d'origine ultra-tellienne provenant du sillon tellien, charriés sur les marnes du Crétacé supérieur et celles du Paléocène-Eocène moyen.

L'Eocène supérieur et l'Oligocène inférieur sont caractérisés par des grès numidiens charriés et présents au N-E de Constantine, notamment, dans le Djebel Ouahch. Le Mio-Pliocène post-nappe est caractérisé par de petites lagunes individualisées ; ainsi les dépôts observés [6] entre le bassin de Mila et Constantine sont de type lagunaire (calcaires lacustres et marnes ou argiles évaporitiques) et continental (conglomérats, graviers, sables, argiles).

Contexte tectonique et structural

Plusieurs phases tectoniques de l'orogène de la chaîne des Maghrébides (Alpine) se sont succédées depuis le mésozoïque jusqu'au Plio-Quaternaire, voire actuelle [5,6].

- Au Mésozoïque, la tectonique a débuté au Trias par une période de distension généralisée, accompagnée d'une sédimentation argilo-gypseuse dominante. Au Jurassique inférieur, la distension provoque une subsidence différentielle, qui se poursuit au crétacé inférieur lors de la structuration générale Est-Ouest. Dès la fin du Lias, au Crétacé, la plate-forme constantinoise s'érige en haut fond.

- Au Tertiaire, la phase lutecienne, à structure compressive, a provoqué le déplacement et la mise en place des flyschs dans la partie Est constantinoise.

- Au Plio-Quaternaire, se sont formées les structures actuelles de la plate-forme constantinoise. Selon Arris [6], la tectonique post-nappe, polyphasée (Compression-distension), se caractérise par des plis de direction N60°E à N80°E, des failles inverses, et des failles normales plus tardives de direction N45°E et N60°E. Les phases compression-distension ont provoqué la réactivation des accidents, avec pour conséquences le basculement des structures jurassico-crétacées vers le Sud, l'enfouissement des blocs, parfois, aboutissant à des fossés d'effondrement, tel qu'entre Ain Smara-Constantine (Fig. 2).

CONSÉQUENCES HYDROGÉOLOGIQUES

Il est clair que la série carbonatée mésozoïque constitue un système aquifère régional majeur. La fracturation et l'émergence de ces carbonates ont favorisé les circulations d'eau souterraine et, par voie de conséquence, le développement de phénomènes karstiques. Ce système aquifère carbonaté est compartimenté en grands ensembles délimités par les accidents de grande amplitude N45°E.

Par ailleurs, constitués de calcaires lacustres, de conglomérats, de sables, de grès et d'argiles, disposés parfois en lentilles ou en chenaux, les différents dépôts de la couverture néogène sont tantôt perméables, tantôt imperméables. Mais, comme vont le montrer les données relatives aux conditions d'émergence, la fracturation intense confère à cet ensemble, par la nature lithologique et l'ouverture de fractures N45°E et N60°E et NS, une perméabilité suffisante pour permettre l'infiltration et l'écoulement d'eaux souterraines en relation plus ou moins aisée avec l'aquifère carbonaté sous-jacent.

Les conditions hydrogéologiques

La tectonique cassante qui a affecté le Constantinois a produit, outre le compartimentage des calcaires par des accidents N45°E, l'enfouissement en graben dans la partie Nord [7]. Il est clair que cette structure de graben, due à la réactivation des accidents mésozoïques et aux accidents qui leurs sont orthogonaux, produits lors de la tectonique tertiaire, est responsable du thermalisme. Ce dispositif hydrogéologique est classique et a été décrit ailleurs [8].

Dans le Constantinois, la karstification ascendante des carbonates aurait débuté au Nord, au niveau de l'accident majeur très profond M'Cid-Aicha-Debar (Fig. 1) limitant les grabens septentrionaux de la plate-forme en se développant

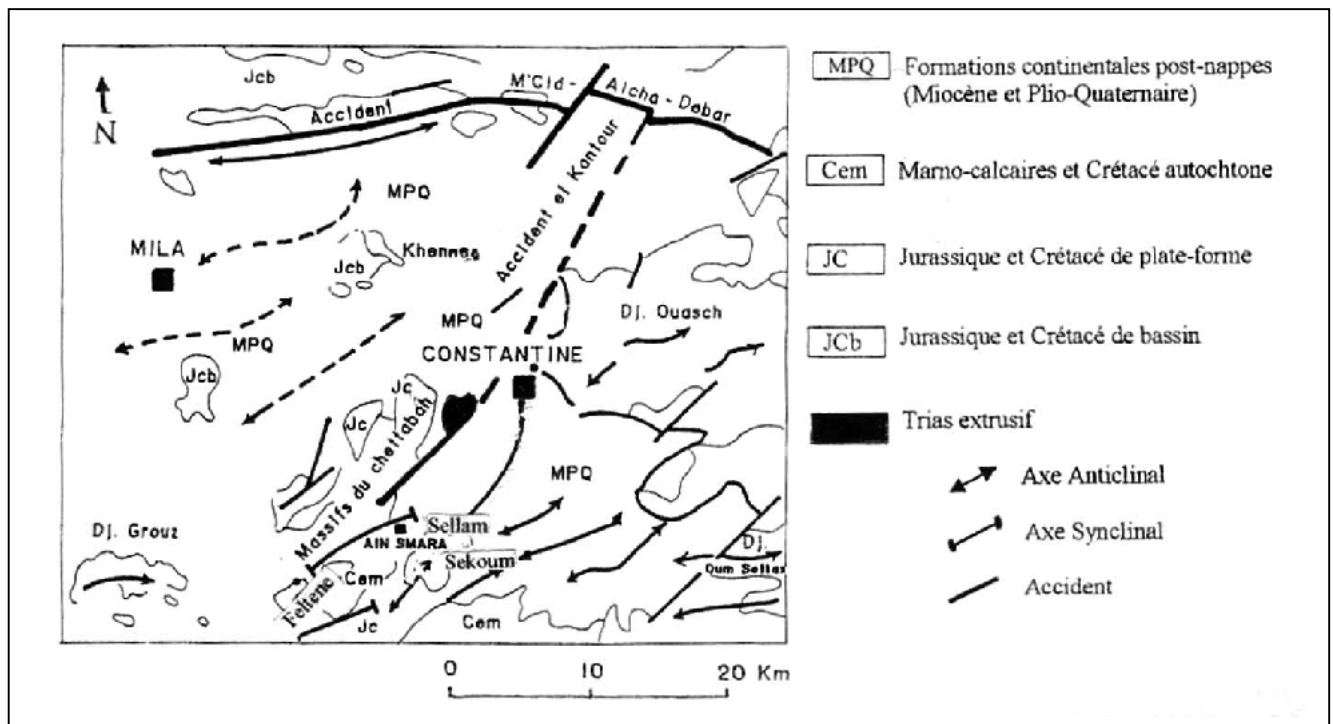


Figure 2 : Environnement géologique de la région constantinoise.

latéralement vers le Sud, jusqu'aux monts Sekkoum, Ouled Sellem, Feltene, érigés à la faveur de l'accident majeur N60°E (Fig. 1).

La tectonique tertiaire a eu d'autres effets au plan hydrogéologique. En effet, les crises tectoniques succédées au Tertiaire, ont provoqué plusieurs dépressions, dans lesquelles ce sont déposés les sédiments à faciès laguno-continentale au Mio-Pliocène post-nappe [6]. En conséquence, les dépôts graveleux, sableux, conglomératiques, et calcaires lacustres fracturés, perméables, formeraient une zone d'infiltration au système, alors que les argiles néogènes mettent en situation captive le même système aquifère. Ce dernier point explique la multiplicité des émergences, en l'occurrence les nombreux griffons composant l'Ain Zouaoui, du fait de la pression exercée par les argiles sur les circulations d'eaux latérales provenant de l'aquifère karstique. Ce cas a été décrit dans des travaux récents sur l'aquifère karstique de Bou Saada (Ouest Algérien) [9], où l'environnement géologique est tout à fait similaire à celui de la région constantinoise.

Notons par ailleurs, que les eaux circulant dans la formation tertiaire ont une incidence sur la mécanique des sols en sub-surface, notamment à la périphérie Ouest et SE de Constantine, où les terrains sont composés, pour l'essentiel, d'argiles miocènes.

Les aquifères

Autour de Constantine, certaines sources jaillissent directement des calcaires; la plupart, cependant, émergent au travers de la couverture néogène (Fig. 3). La principale zone d'émergence d'eaux thermales est située à Hamma

Bouziane; les dépôts continentaux possèdent dans ce secteur une épaisseur de 100 à 200 m, prouvée par certains forages [2]. Ainsi, la couverture néogène favorise au moins la remontée des eaux de l'aquifère sous-jacent.

Il existe également au voisinage des sources d'importants dépôts de travertins, en particulier à Hamma Bouziane.

Par ailleurs, lorsqu'elle affleure, la série carbonatée présente les caractères morphologiques typiques du karst; ceux-ci permettent d'envisager un fonctionnement karstique des aquifères qu'elle contient. Ainsi, en amont de Constantine, l'Oued Rhumel se perd en partie entre Oued Athmania et Ain Smara [10], très probablement au contact des accidents d'Ain Smara (Fig 2); ces pertes pourraient constituer l'une des modalités d'alimentation des sources du Constantinois. Des travaux portant sur les nuisances des eaux de l'aquifère, ont pu révélé d'autres pertes du Rhumel dans le massif de Constantine.

Les principaux sites hydrogéologiques

Au Rocher de Constantine, limité par des failles profondes, dont le grand accident du fossé d'effondrement Ain Smara-Constantine, des sources émergent directement du massif carbonaté, à la faveur de fractures; la température des eaux de sources hautes varie autour de 29°C. D'autres sources à très faible débit, à écoulement saisonnier, donnent des eaux autour de 20°C.

Hamma Bouziane Nord, à proximité Nord Ouest de Constantine, est traversée par le grand accident d'El Kantour (Fig 2). A l'Est, il est limité par l'accident Est du

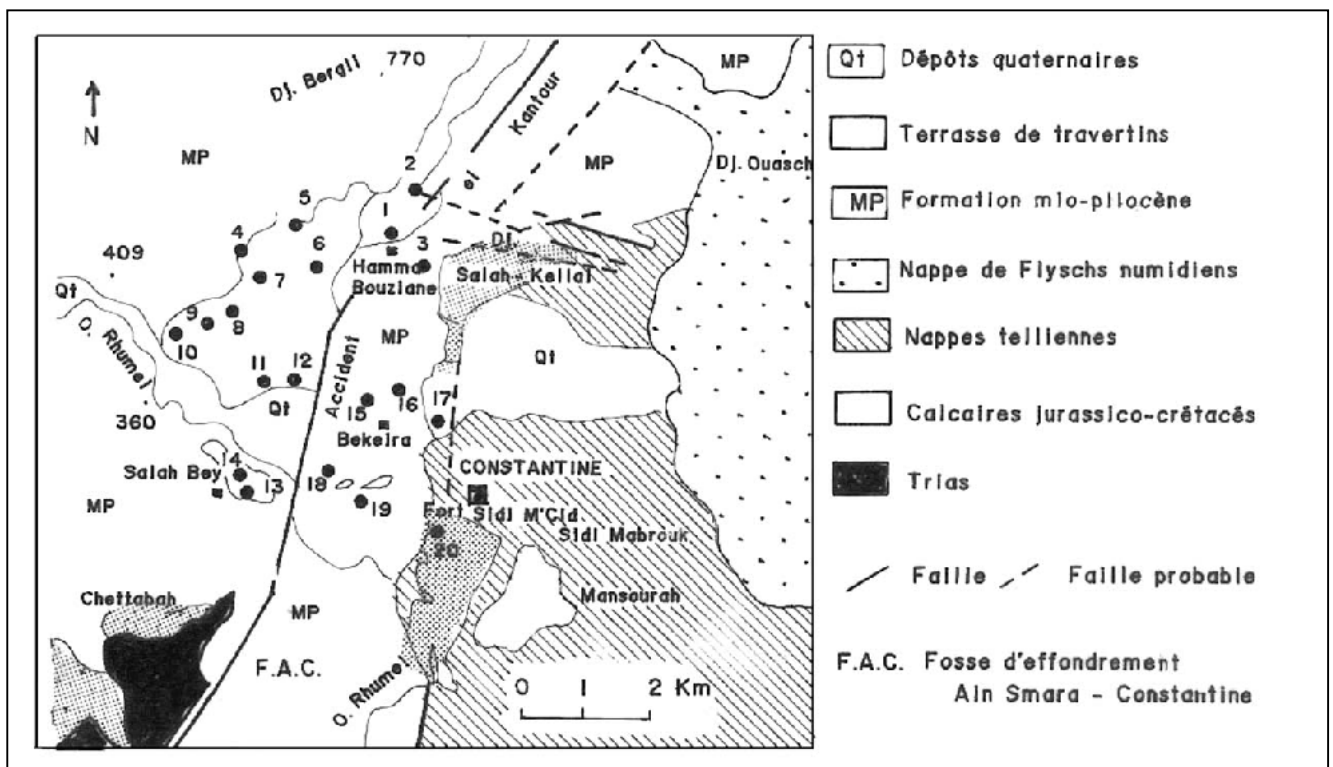


Figure 3 : Situation et condition d'émergence des sources de l'aquifère thermal constantinois (D'après carte géologique Constantine 1/200.000, J.M. VILA, 1977 ; et d'après cadre structural du Constantinois 1/40.000, Y. ARRIS, 1994).

Tableau 1: Caractéristiques des principales sources et des forages échantillonnés de l'aquifère thermal constantinois. (* tarissement de la source à cause de l'exploitation de l'aquifère par de nombreux forages).

Sites	Sources	Références	Côte (m)	T (°C)	Q moy (l/s)	Conditions d'émergence	Observations
Constantine	Sidi Mcid	20	480	29	20	Calcaires Jurassico-crétacés	-
	Moulin la vie		450	27	10		Temporaire
	Sidi Mimoun		452	28	<1		Tarie
	Ain Rached		490	28	≈ 4		Tarie
	Ain Chekkar		470	28	≈ 5		Tarie
	Ain Taker		400	21	<1		-
	Roumanie		560	18	<1		Conglomérats, argiles Marnes évaporitiques
Hamma Bouziane	Ain Zouaoui	1	480	32	*800	Alluvions	Débit actuel <10 l.s ⁻¹
	Ain Skhouna	-	505	36	25	Alluvions	Débit actuel <1 l.s ⁻¹
	forage	2	505	36 à 38	45	Calcaires crétacés	-
	Ain Bergli	-	505	33	7	Travertins	temporaire
	Ain Rhiren	-	500	20	<10	Travertins	tarie
	Ain Toundji	5	510	21	<5	Travertins	-
	Ain Touta	7	400	20	11	Travertins	-
	Ain Murat	6	500	25	≈11	Travertins	-
	Source	3	500	18	≈10	Calcaires lacustres néogènes	-
	Source	4	450	18	<5	Dépôts miocènes	-
Ain Bou sbâ sources	8	450	21	<6	Travertins	temporaire	
	9, 10, 11, 12	450 à 500	20 à 21	≈10	Travertins	-	
Salah Bey	Ain Salah Bey	13	471	25	15	Travertins	-
	Forage	14	471	26	40	Calcaires crétacés	-
Békeira	Sources	15, 16, 17, 18, 19	350 à 400	18 à 21	10 à 15	Calcaires lacustres néogènes	-

fossé d'effondrement qui borde le Rocher de Constantine, le djebel Salah-Kellal et se termine contre le grand accident Mcid Aicha-Debar. Les températures des sources (18° à 32°C), un peu plus élevées que celles des autres sites, indiquent une circulation des eaux assez profondes. Pour la plupart, les sources émergent des travertins que leurs eaux ont déposés (précipitation du carbonate de calcium dissous par dégazage du CO₂ dès l'émergence) sur la couverture néogène.

Salah Bey est situé à la pointe Nord du Chettabah, à l'Ouest de Constantine. Structuralement, cette zone correspond à l'intersection des anticlinaux SW-NE des massifs du Chettabah et des fractures qui les délimitent orthogonalement, responsable d'ailleurs de la remontée diapirique du Trias. Dans ce site, les sources émergent des travertins déposés sur la couverture néogène ; leurs eaux ont une température comprise entre 25° et 28° C.

A Békeira, dans le prolongement Nord du fossé d'effondrement Ain Smara - Constantine (entre le massif de Constantine et Hamma Bouziane), les calcaires lacustres exhaurent des sources à températures comprises entre 18 et 21° C.

Les principales caractéristiques des plus importantes émergences sont sommairement présentées au tableau 1.

HYDROGÉOCHIMIE

Parmi tous les points d'eau, 20 prélèvements ont été effectués aux sources et forages des différents sites. Les données hydrochimiques (Tab. 2) révèlent le caractère

nettement bicarbonaté calcique de toutes les eaux ; seules les eaux des sites 15, 16, et 17, issues des calcaires lacustres de Békeira, présentent des concentrations comparativement un peu plus faibles en Ca²⁺, HCO₃⁻, très faibles en Mg²⁺, et plus élevées en SO₄²⁻ et en Cl⁻. La source 9, située dans la partie Sud des travertins de Hamma Bouziane, se distingue par sa forte concentration en sulfates.

Signification des concentrations en ions alcalins

Les variations observées des concentrations des espèces dissoutes analysées et de la minéralisation, pour l'ensemble des échantillons, laissent envisager des mélanges d'eaux ayant des origines ou des conditions d'écoulement diverses. Certains indices suggèrent que les formations sablo-argileuses jouent un rôle notable dans le chimisme de certaines de ces eaux.

En particulier, l'analyse de la régression entre la concentration totale en (Na⁺+K⁺) et celle en Cl⁻ donnent les informations suivantes :

- L'équation du modèle est : $C_{(Na+K)} = 87.52 + 0.335 * C_{Cl}$.

- Le coefficient de corrélation $r = 0.5446$.

- La relativement faible valeur du coefficient de détermination ($r^2 = 0.296$) indique que la concentration en Cl⁻ n'explique que 29.66% de la variabilité de la concentration en (Na⁺+K⁺).

Ce résultat signifie qu'une ou plusieurs autres variables doivent être responsables de la variance observée des concentrations en Na⁺ et en K⁺.

Les ions alcalins, lorsqu'ils ne sont pas associés aux minéraux évaporitiques, en particulier la halite, sont généralement fournis par les formations riches en silicates.

Tableau 2: Caractéristiques physico-chimiques et composition chimique des eaux de sources et des forages échantillonnés de l'aquifère thermal constantinois.

Références	T °C	pH	EC $\mu\text{s/cm}$	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Na ⁺ +K ⁺ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
1	32	7.60	1230	119.00	26.00	128.00	425	135.0	140.0
2	36	7.60	1220	115.00	31.60	175.00	512	131.0	189.0
3	19	7.80	920	70.00	48.00	82.30	399	88.70	98.0
4	18	7.80	820	136.00	36.00	48.30	364	42.60	214.0
5	25	7.70	1120	111.00	67.00	76.00	503	142.0	106.0
6	21	7.50	1360	113.00	67.00	171.00	498	163.0	200.0
7	21	7.80	1370	124.00	49.30	124.00	484	170.0	143.0
8	20	7.90	1720	147.00	49.60	202.00	620	224.0	182.0
9	21	7.20	1240	135.00	47.90	150.00	170	160.0	556.0
10	20	7.60	2190	170.00	104.0	123.00	713	278.0	145.0
11	21	7.90	1140	120.00	44.20	167.00	539	167.0	165.0
12	20	8.00	1490	116.00	71.40	93.00	639	153.0	129.0
13	25	7.80	1080	108.00	37.10	189.00	555	159.0	150.0
14	26	8.00	1130	115.00	31.60	199.00	512	163.0	195.0
15	19	7.80	510	68.10	3.80	105.00	178	28.40	220.0
16	18	7.50	530	60.10	5.30	109.00	188	24.80	212.0
17	18	7.40	1050	70.00	7.40	166.00	130	142.0	202.0
18	21	7.90	1260	123.00	42.60	122.00	432	156.0	169.0
19	20	7.90	1650	190.00	33.40	182.00	423	312.0	213.0
20	28	7.50	1200	123.00	31.60	138.00	493	142.0	129.0

Malheureusement, les moyens analytiques limités dont nous disposons n'ont pas permis de mesurer les concentrations en silice (SiO₂) qui aurait conduit à mieux caractériser les eaux transitant par les formations sablo-argileuses, et donc l'alimentation éventuelle des aquifères karstiques sous-jacents à partir de la couverture néogène fracturée. Nous disposons, cependant, d'un indice laissant fortement présumer du rôle de la couverture sablo-argileuse dans les écoulements souterrains de cette région.

Géochimie des carbonates

A partir des concentrations mesurées en éléments majeurs, les indices de saturation des eaux pour les minéraux carbonatés (SIc pour la calcite, SID pour la dolomite) et le gypse (SIG) ont été calculés, ainsi que la pression partielle équilibrante en CO₂, pCO₂, exprimée en 10⁻³ bar (Tab. 3). En effet, ces paramètres sont des informateurs essentiels [10,11] des conditions d'écoulements auxquelles ils sont soumis dans les aquifères carbonatés.

Les valeurs obtenues pour SIc et SID indiquent que, pour la plupart, les eaux sont sursaturées à la fois en calcite et en dolomite. Le taux de saturation, très élevé, dépasse souvent 0.5, valeur considérée comme la limite au-dessus de laquelle la précipitation de calcite se produit ou s'est produite. En ce qui concerne SID, ses valeurs très élevées résultent de la précipitation de la calcite ; rappelons que la dolomite ne précipite jamais dans ces conditions et que la précipitation de calcite se traduit par un enrichissement relatif de la solution en Mg²⁺. Ainsi, les rapports molaires Mg²⁺/Ca²⁺ proches ou supérieurs à 1 témoignent de cet enrichissement. Par conséquent, dans la plupart des cas, avant d'émerger, les eaux souterraines ont déjà subi, à l'intérieur des aquifères, un dégazage important de leur CO₂ dissous et un début de précipitation

Tableau 3: Saturations des eaux de sources et des forages échantillonnés de l'aquifère thermal constantinois.

Références	SIc	SID	SIG	PCO ₂ 10 ⁻³ bar	Ca/Mg
1	0.90	1.37	-1.34	9.70	0.36
2	1.27	2.30	-1.25	4.20	0.45
3	0.67	1.64	-1.68	4.80	1.13
4	0.90	1.69	-1.12	4.50	0.44
5	0.95	2.03	-1.53	8.20	1.00
6	0.66	1.51	-1.29	1.20	0.98
7	1.01	2.04	-1.36	5.90	0.66
8	1.24	2.45	-1.22	5.60	0.56
9	-0.09	-0.23	-0.83	7.90	0.58
10	1.07	2.35	-1.33	1.30	1.01
11	1.14	2.25	-1.31	5.20	0.61
12	1.22	2.65	-1.45	4.10	1.01
13	1.07	2.02	-1.38	7.10	0.57
14	0.83	1.36	-1.38	1.30	0.45
15	0.32	-0.67	-1.29	2.20	0.09
16	-0.22	-0.64	-1.35	4.70	0.15
17	-0.23	-0.97	-1.34	3.90	0.17
18	1.06	2.07	-1.28	4.20	0.57
19	1.14	1.86	-1.06	3.10	0.29
20	0.91	1.59	-1.47	1.00	0.42

de la calcite. Cela signifie que les valeurs calculées de pCO₂ peuvent être notablement inférieures à celles existant effectivement dans l'aquifère.

Cependant, certaines eaux des calcaires lacustres de Békeira (sources 15 et 16) présentent une nette sous-saturation en calcite et en dolomite ; la source 14 possède des caractères intermédiaires, avec une faible sursaturation en calcite et une nette sous-saturation en dolomite. Les très basses valeurs du rapport Mg²⁺/Ca²⁺ vont dans le sens d'une absence de précipitation de calcite avant émergence.

Géochimie des sels évaporitiques

En revanche, les valeurs toujours très négatives de SIg sont dues à une très nette sous-saturation des eaux en gypse. Etant donné les concentrations relativement faibles en SO_4^{2-} (entre 100 et 550 mg/l), la source de SO_4^{2-} doit être recherchée dans les formations néogènes, qui contiennent des niveaux évaporitiques riches en gypse. Du fait de la forte solubilité du gypse, la nette sous-saturation observée sur toutes les eaux est due soit à un mélange entre des eaux dépourvues de ces sels en solution avec des eaux proches de la saturation, soit à un temps de séjour trop court au contact de la roche contenant ce minéral.

L'ion Cl^- est également souvent un marqueur des évaporites. Cependant, l'analyse de la corrélation entre les concentrations en Cl^- et celles en SO_4^{2-} montre que ces deux variables sont indépendantes ($r = 0.0185$). Par conséquent, la source de Cl^- doit être recherchée ailleurs que dans les roches néogènes présentant ce caractère évaporitique. L'origine de Cl^- peut être soit anthropique (eaux usées en particulier), soit des roches plus profondes (argiles triasiques).

Analyses isotopiques du Carbone 13 et Oxygène 18

Les analyses isotopiques du ^{13}C et ^{18}O ont été réalisées sur les bicarbonates des eaux thermales des principales émergences de l'aquifère (Département de Géologie Dynamique, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).

L'information apportée par les bicarbonates [12] est plus intéressante que celle obtenue des carbonates précipités sous forme de travertins ou de concrétion, du fait que les bicarbonates présents dans les solutions n'ont pas pu subir de fractionnement cinétique; ils existent depuis longtemps dans la solution, où ils sont en équilibre chimique et isotopique avec les différents constituants présents (H_2O , CO_2). Les teneurs observées en ^{13}C et en ^{18}O , peuvent être considérées comme identiques [12] dans HCO_3^- , dans H_2O , et dans CO_2 .

Les teneurs isotopiques du carbone 13 et de l'oxygène 18 (Tab. 4) obtenus dans les bicarbonates des eaux des sources Ain Zouaoui, Salah Bey, et Sidi M'cid [13], ont révélé des teneurs globales en oxygène 18 (26.7‰ SMOW) et en carbone 13 (2.0‰ PDB), signifiant que les carbonates dissous de ces eaux sont issus du même aquifère.

Tableau 4: Valeurs isotopiques du Carbone et de l'Oxygène de CO_2 et H_2O dosées dans l'eau des principales sources des sites Hamma Bouziane, Constantine, Salah Bey.

(Pour l'eau : $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O}) = 26.7 - 26\text{‰}$ SMOW, soit $\delta^{18}\text{O} = +0.7\text{‰}$ SMOW),

(Pour le CO_2 : $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2) = 2.0 - 7.44\text{‰}$ SMOW, soit $\delta^{13}\text{C} = -5.4\text{‰}$ PDB).

Eaux de sources	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ PDB	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ PDB	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ SMOW
Ain Zouaoui	+1.99	-1.88	26.84
Ain Salah Bey	+2.03	-1.92	26.68
Sidi M'cid	+2.02	-1.95	26.57

La teneur isotopique en oxygène 18 ($\delta^{18}\text{O} = 0.7\text{‰}$ SMOW), obtenue pour l'eau, est très différente de la valeur -4‰ SMOW attendue dans les eaux météoriques du Constantinois. Ce résultat prouve que les eaux de recharge ont subi une transformation par échange avec la roche à haute température sous l'action des circulations hydrothermales profondes. Le contenu isotopique ($\delta^{13}\text{C} = -5.4\text{‰}$ PDB), obtenu dans le CO_2 , indique une origine profonde de ce gaz, très probablement de décarbonatation, et corrobore la teneur en oxygène 18 contenue dans l'eau.

Des analyses plus complètes en ^2H , en ^{18}O et en ^{13}C , sur les eaux de ces sources, permettraient d'apporter plus de précisions sur l'origine du CO_2 .

CONCLUSION

L'environnement géologique du Constantinois et les données hydrogéochimiques indiquent deux modalités de recharge de l'aquifère : une infiltration directe dans les fractures des horsts et une infiltration lente des eaux d'écoulement de la formation néogène, du fait de la faible corrélation des ions alcalins avec les ions chlorures.

Par ailleurs, les saturations en dolomites et en calcites signifient que la zone noyée du système se trouve à plusieurs centaines de mètres en profondeur, voire dans les carbonates jurassiques. Les calcaires crétacés sont alors le siège de circulation d'eaux thermale profonde et de recharge. Le grand nombre d'émergences, concentrées entre Hamma Bouziane et le massif de Constantine, sont la décharge d'un système aquifère thermal complexe, de vaste étendue, dans lequel s'est organisé un réseau de drainage des eaux du Sud vers le Nord.

Par ailleurs, une surexploitation de l'aquifère pourrait entraîner une modification du fonctionnement du système à cause du processus de précipitation de la calcite à l'intérieur de l'aquifère. En outre, compte tenu des pertes du Rhumel dans l'aquifère et des polluants que ce cours d'eau contient, il est prudent de prévoir un programme de protection de l'aquifère contre les nuisances des eaux. Ce sont là, deux des soucis majeurs posés par le fonctionnement des aquifères karstiques.

REFERENCES

- [1]- Durozoy G., "Hydrogéologie des massifs calcaires crétacés des monts de Constantine", Etude préliminaire, XIX Cong. Géol., Alger, Tome II, (1952), pp.95-111.
- [2]- Durozoy G., "Les sources thermales de Constantine et du Hamma", *Terre et eaux*, Bull. n°6, Asso. Hydrogéol., Alger, (1955), pp. 18-43.
- [3]- Benkadja R., "Etude Hydrogéologique de la région de Constantine", Mém. DEA, CNRS. Lab. Souterrain. Moulis, (1983), p.36.
- [4]- Thomas C., "Evolution des aquifères karstiques hydrothermaux ; analyse du système Hamma Bouziane-Constantine", Séminaire régional. Univ. Mentouri, Constantine, (1986), p. 19.
- [5]- Vila J.M., "La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens", Thèse. Doct. Etat, Univ. Paris VI^e, 3t, 199 fig., (1980), 586p.
- [6]- Arris Y., "Etude tectonique et microtectonique des séries jurassiques à plio-quatérnaires du constantinois central (Algérie nord-orientale) : caractérisation des différentes

- phases de déformation", Thèse Doct. Sci. Terre, Univ. Henri Poincaré-Nancy1, Nancy, 73 fig., (1994), p. 201.
- [7]- Coiffait P.E., Quinif Y., Vila J.M., "Histoire géologique et karstification des massifs néritiques constantinois (Algérie)", Acte Symp. Grenade. Ann. Spéleol, (1975), pp.619-627.
- [8]- Maisonneuve J., et Risler J.J., "La ceinture péri-alpine « carbo-gazeuse » de l'Europe occidentale", *Bull. BRGM*, 3, 2, (1979), pp. 109-120.
- [9]- Banton O. et Bangoy L.M., "Hydrogéologie multisciences environnementale des eaux souterraines. Presse de L'université du Québec/AUPEL-UREF, 87 fig., (1999), p.460.
- [10]- Mebarki A., et Thomas C., "Analyse des relations entre écoulements superficiels et souterrains à partir des hydrogrammes des cours d'eau. Application au bassin du Kébir-Rhumel dans le Constantinois (Algérie)", *Revue Hydrologie continentale*, O.R.S.T.O.M, Paris, vol.3, n°2, (1988), pp. 89-103.
- [11]- Djebbar M., Kifouche R. et Ammari H., "Contamination des eaux de Surface et des eaux souterraines du Constantinois par les effluents industriels (Algérie Nord-orientale)". Sevth Int. Conf. Geol. Arab World (GAW-7), Cairo Univ., (2004), p.4.
- [12]- Bakalowicz M., "La géochimie isotopique des sédiments karstiques : apports, problèmes et perspectives", *Ann. Sc. Univ. Besançon. Géologie Mém.*, n°1, (1982), pp.227-239.
- [13]- Bakalowicz M., "Un précieux informateur hydrogéologique : le système chimique CO₂-H₂O-carbonates", Colloque Soc. Géol. Fr. Minéral. Cristall., Bordeaux, (1980), pp.11-23.
- [14]- Djebbar M., "Le karst hydrothermal de la région de Constantine : Fonctionnement et modalité d'infiltration", Thèse Magister Sc. Terre, Univ. Mentouri, Constantine, (1991), p.162.
- [15]- Bakalowicz M., "Géochimie des eaux et flux de matières dissoutes, l'approche objective du rôle du climat dans la karstogenèse", *Karst et évolution climatique*, Presse Univ. Bordeaux, (1992), pp.60-72. □