

## Contribution à l'étude de sources thermominérales de Grèce – Les sources thermominérales de Kyllini par rapport au régime hydrothermal du Péloponnès occidental

*Beitrag zum Studium der Thermalwässer Griechenlands – Die Thermalquellen von Kyllini im Vergleich zum hydrothermalen Regime des westlichen Peloponnes*

G. A. KALLERGIS & N. J. LAMBRAKIS<sup>1)</sup>

### Contenu

	Page
Introduction .....	208
1. Les Caractères hydrogéologiques de la région des sources thermominérales .....	208
1.1. Formations alpines .....	208
1.2. Formations postalpines .....	208
2. Caractéristiques physicochimiques des eaux thermominérales.....	209
2.1. La température du réservoir des fluides et des eaux thermominérales.....	209
2.2. Le débit de la nappe aquifère des eaux thermominérales.....	210
2.3. Le caractère hydrochimique des eaux thermominérales de Kyllini...	210
3. Le régime géothermal du Péloponnès occidental.....	214
3.1. Généralités.....	214
3.2. Description hydrochimique des sources.....	214
Résumé .....	218
Bibliographie.....	219
Zusammenfassung .....	219
Summary .....	219

Der vorliegende Beitrag wurde dankenswerterweise von Frau Isabelle HARUM sprachlich überarbeitet.

<sup>1)</sup> G. A. KALLERGIS, N. J. LAMBRAKIS, Université de Patras, Département de Géologie, Laboratoire d'hydrogéologie et de Géologie du Génie Civil, 261 10 Patras, Grèce.

## Introduction

Une carte géologique à 1 : 5000 a été établie et l'étude du mécanisme de fonctionnement des sources a été réalisée dans le cadre de la recherche scientifique menée sur les eaux thermominérales de la région de Kyllini. Nous avons également examiné le régime des sources et leur évolution chimique au cours d'un cycle hydrologique complet.

Les sources thermominérales de la région de Kyllini – source de Kyllini proprement dite et forage d'Heli à écoulement automatique – jaillissent des marnes néogènes à la cote +16 m et à une distance de 400 m du rivage. Elles proviennent des roches carbonatées et des gypses environnants et sont guidées par des failles subméridiennes qui, selon G. CHRISTODOULOU (1971) limitent le littoral.

De nombreux forages profonds ont été effectués dans la région de Kyllini, mais rares sont ceux qui ont rencontré des eaux thermominérales; il s'agit des forages d'Heli, d'Arranitis et de Mavropoulos, situés 500 m à l'est de la source de Kyllini. D'autres forages ont été effectués non loin des précédents sans rencontrer d'eaux thermominérales, ce qui signifie que l'alimentation s'effectue par l'intermédiaire d'anomalies tectoniques correspondant très vraisemblablement à des failles majeures.

### 1. Les Caractères hydrogéologiques de la région des sources thermominérales

Les formations géologiques de la région concernée sont les suivantes.

#### 1.1. Formations alpines

- a) Les gypses: d'âge triasique, ils apparaissent à travers les sédiments néogènes selon des processus diapiriques.
- b) Les calcaires jurassiques à crétacés, en bancs peu épais (surtout dans la partie inférieure), appartiennent à la zone Ionienne et affleurent près du village de Kastro de même qu'à quelques centaines de mètres au sud de celui-ci. De faible extension (0,2 km<sup>2</sup>), ils sont très fracturés à cause des déformations diapiriques liées à la présence de gypses.

Calcaires et gypses constituent des terrains perméables.

#### 1.2. Formations postalpines

D'après G. CHRISTODOULOU (1971) les formations néogènes de la région de Kyllini ont une épaisseur considérable pouvant atteindre environ 800 m. Elles consistent en une alternance de sables, d'argiles, de marnes sableuses, de conglomérats et de grès plus ou moins indurés. Les variations lithophasiques sont importantes tant horizontalement que verticalement, ce qui implique une hétérogénéité lithologique. Il faut noter la grande extension des dépôts pliocènes.

Sur le littoral, on observe des sédiments plus récents, d'épaisseur variable et d'âge holocène.

Les dépôts néogènes constituent, de par leurs caractères lithologiques, des formations très peu perméables voir imperméables. Ils renferment pourtant des nappes aquifères du type de celles qui existent au sud des sources thermominérales de Kyllini parce qu'ils contiennent des conglomérats sous forme lenticulaire. Il s'agit de nappes successives comme il en résulte des données de forages ayant rencontré l'eau à différentes profondeurs de +15 m à +45 m.

La source d'eau douce de Kyllini dont le débit s'est situé pendant la période du 26/03/89 au 20/03/90 autour de 12 m<sup>3</sup>/h est une autre manifestation de ces nappes aquifères.

Des failles majeures orientées N.S. déterminent, du point de vue tectonique, la présence de l'affleurement des calcaires ioniens ainsi que la direction du littoral (G. CHRISTODOULOU, 1971). Les gypses triassiques se sont déformés le long de ces failles avec pour conséquence l'apparition de dômes diapiriques.

Les accidents N.S. sont directement visibles dans les calcaires crétacés, mais ils affectent également les assises néogènes dans lesquelles ils induisent les chemins de diffusion des eaux thermominérales. Ceci est mis en évidence grâce à des forages qui ont rencontré des eaux thermominérales dans des zones privilégiées.

## 2. Caractéristiques physicochimiques des eaux thermominérales

### 2.1. La température du réservoir des fluides et des eaux thermominérales

La nappe aquifère des eaux thermominérales de Kyllini prend naissance dans les calcaires du Crétacé. D'après FOURNIER-TRUSDELL et selon des conditions bien définies (la réaction entre roche et fluide est en équilibre, il n'y a pas de mélange avec des fluides de nature différente etc. – toutes ces conditions étant ici respectées comme on le verra ci-après), il est possible de calculer la température du réservoir des eaux thermominérales. Ainsi, en ayant recours à des géothermomètres Na-K et Na-K-Ca, nous pouvons estimer la température des eaux de réservoir selon les méthodes suivantes:

a) d'après FOURNIER:

$$T^{\circ} \text{C} = \frac{1217}{\log (\text{Na}^2/\text{K}) + 1,48} - 273,15 = 105,36^{\circ} \text{C}$$

b) d'après FOURNIER-TRUSDELL:

$$T^{\circ} \text{C} = \frac{1647}{\log (\text{Na}/\text{K}) + \beta \{ \log (\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2,06 \} + 2,47} - 273,16 = 115,47^{\circ} \text{C}$$

Quant à la température des eaux thermominérales elle reste constante dans le temps. Comme le montrent les tableaux 1 et 2, tant pour la source de Kyllini que pour le forage d'Héli, de faibles variations thermiques de l'ordre de quelques dixièmes degrés Celsius sont observables. Elles ne correspondent ni aux variations climatiques ni

<sup>2)</sup> Les concentrations de Na = 750 mg/l, K = 13,8 mg/l et Ca = 67,2 mg/l proviennent de l'analyse d'échantillons prélevés le 13/11/89.

au débit des sources. Ainsi, la température donne-t-elle une première indication intéressante: pendant leur ascension vers la surface, les eaux thermominérales ne se mêlent pas à d'autres en quantité suffisante pour modifier sensiblement leur propre température.

## 2.2. Le débit de la nappe aquifère des eaux thermominérales

Comme on peut le voir sur le tableau 1, le débit de la source de Kyllini présente une légère variation comprise entre les valeurs extrêmes de 13,6 m<sup>3</sup>/h et 15 m<sup>3</sup>/h durant le laps de temps du 26/03/89 au 20/03/90. Le débit du forage d'Heli varie dans le même intervalle de temps (tab. 2) de 10,2 à 12,24 m<sup>3</sup>/h.

La variation des débits dépend manifestement de la succession des périodes sèches et humides au cours de l'année. De petites sources rendant en moyenne 5 m<sup>3</sup>/h dans la même région, on peut considérer que le débit total moyen des sources d'eaux thermominérales est de l'ordre de 30 m<sup>3</sup>/h. Il faut ajouter à ce débit une valeur de 10 m<sup>3</sup>/h issue des deux forages supplémentaires localisés dans la même région. On ne remarque aucune variation du débit de la source de Kyllini au cours du pompage dans les forages, bien que la nappe aquifère d'eau thermominérale puisse rendre au moins 40 m<sup>3</sup>/h. Cette quantité d'eau ne provient pas uniquement des eaux d'infiltration dans les calcaires et les gypses mésozoïques dont l'extension est réduite à seulement 0,2 km<sup>2</sup>. Etant donné que l'eau thermominérale est issue des calcaires (puisque rMg/rCa = 0,7, v. tab. 1), il faut admettre par conséquent que l'aire d'alimentation se prolonge à une grande distance des sources; la lithologie des formations néogènes dans lesquelles l'eau possède un rapport rMg/rCa = 0,30 alors que ce même rapport est de 0,6 à 1 pour les eaux thermominérales ne favorise d'ailleurs guère l'infiltration d'eau en quantités importantes.

## 2.3. Le caractère hydrochimique des eaux thermominérales de Kyllini

L'étude des tableaux 1, 2 et 3 permet de déterminer les caractères hydrochimiques des eaux thermominérales de Kyllini:

- a) Nous avons effectué des mesures systématiques mensuelles du 26/03/89 au 20/03/90 et avons pu ainsi constater que le taux de minéralisation des eaux reste constant. De modestes variations de ce taux s'observent toutefois; elles semblent correspondre à des variations analogues du débit tant de la source de Kyllini que du forage d'Heli. Nous pouvons faire la même constatation en analysant le tableau 3 concernant les analyses chimiques des eaux de la source de Kyllini de 1893 à nos jours. Elles confirment la conclusion générale de M. PERTESIS (1951) quant à „la constance de la composition chimique et de la température des sources thermominérales de Grèce“.
- b) Le rapport rMg/rCa, compris entre les valeurs 0,65 et 1, montre que les eaux thermominérales proviennent des calcaires. Certains écarts sont imputables soit à une précipitation importante des sels, soit, plus probablement, à des erreurs survenues au cours de l'analyse chimique.
- c) La valeur du rapport rCl/rBr est égale à 650 pour l'eau de mer; elle est de 890 pour les eaux thermominérales de Kyllini. Il est bien connu que les valeurs supérieures à 650 correspondent à des eaux traversant des évaporites (BEHNE, 1953).

Tab. 1: Les caractéristiques physicochimiques de la source de „Kyllini“ par mois et pour le laps de temps du 26/3/89 au 20/3/90. 1. Caractéristiques en mg/l, excepté ou il est noté; 2. Les valeurs déterminées sur le terrain sont entre parenthèses; 3. r = meq/l.

	26/3/89	16/4/89	15/5/89	12/6/89	14/7/89	24/9/89	24/10/89	13/11/89	18/12/90	12/1/90	19/2/90	20/3/90
T °C	(24,00)	(24,40)	(23,40)		(23,40)	(23,40)	(34,40)	(23,40)	(24,00)	(23,40)		(22,90)
pH	7,24	7,32	(7,37)	(7,37)	(7,25)	(7,39)	7,74	7,38	7,48	(7,31)	7,54	
E.C.	4150,00	4300,00	4000,00	3800,00	3600,00	4200,00	3700,00	3500,00	3800,00	4200,00	3700,00	4100,00
Ca <sup>2+</sup>	67,20	67,20	48,00	63,20	64,40	70,00	64,80	67,20	66,40	59,20	61,60	67,60
Mg <sup>2+</sup>	33,30	49,00	45,00	42,50	36,20	34,10	37,44	43,20	35,50	43,20	39,85	34,99
Na <sup>+</sup>	800,00	807,00	815,00	821,00	796,00	782,00	738,00	750,00	780,00	800,00	820,00	658,00
K <sup>+</sup>	11,80	3,14	14,80	15,00	14,43	14,40	14,50	13,80	14,00	14,20	13,40	13,00
Cl <sup>-</sup>	914,00	990,00	925,00	1045,00	950,00	975,00	905,00	1005,00	965,00	945,00	935,00	980,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	530,00	561,20	556,30	588,00	644,00	553,90	586,80	590,50	561,20	575,80	570,96	574,62
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	150,00	(88)	136,00	270,00	130,00	205,00	150,00	225,00	190,00	160,00	70	190,00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	12,80	64,46	34,76	29,48	24,20	10,90	27,40	53,00	51,00	22,00	22,50	27,90
CO <sub>2</sub>	(118,0)	(64)	(95)	(93)		(134,0)	(128)	(119)	(117)	(122)	(118)	
H <sub>2</sub> S	(25,0)	(20)	(20)	(30)		(40,0)	(35)		(40)	(50)		(50)
T.D.S.	2519,10	2630,01	2574,86	2874,18	2659,23	2645,30	2523,94	2747,7	2663,10	2619,4		
rMg/rCa	0,82	1,20	1,54	1,11	0,93	0,80	0,96	1,06	0,88	1,20	1,06	0,85
rNa/rCl	1,35	1,26	1,36	1,21	1,29	1,24	1,26	1,15	1,25	1,31	1,35	1,04
rSO <sub>4</sub> /rCl	0,12	0,06	0,10	0,19	0,10	0,16	0,12	0,17	0,15	0,12	0,06	0,14
rNa/rK	115,93	100,28	93,24	93,95	93,51	91,89	86,76	93,17	94,19	96,61	104,85	86,70
Débit (m <sup>3</sup> /h)	14,90	15,00	15,30	15,30	15,00	14,50	13,60	13,60	13,60	14,80	15,30	

Tab. 2: Les caractéristiques physicochimiques du forage de „Heli“ par mois et pour le laps de temps du 26/3/89 au 20/3/90.

	26/3/89	16/4/89	15/5/89	12/6/89	14/7/89	24/9/89	24/10/89	13/11/89	18/12/90	12/1/90	19/2/90	20/3/90
T °C	(22,36)	(23,00)	(23,60)	(22,70)		(23,30)	(23,00)	(23,10)	(23,20)	(22,20)	(22,30)	(21,80)
pH	7,13	7,25	(7,12)	(7,10)	(7,16)	(7,34)	7,45	7,26	7,25	(7,11)	7,39	
E.C.	3200,00	3000,00	3100,00	2800	3000,00	3300,00	2900,00	2900,00	3300,00	3300,00	3300,00	2900,00
Ca <sup>2+</sup>	88,40	87,20	67,60	80	82,40	105,20	88,00	82,80	88,00	87,20	76,40	103,20
Mg <sup>2+</sup>	33,70	12,48	18,24	27,6	33,60	30,00	35,52	45,80	35,30	36,96	45,20	24,78
Na <sup>+</sup>	630,00	628,00	615,00	607,00	561,00	591,10	590,00	590,00	590,00	610,00	650,00	505,00
K <sup>-</sup>	8,80	9,75	10,58	10,00	8,58	9,36	11,50	11,00	11,20	11,20	35,20	10,20
Cl <sup>-</sup>	686,00	705,00	690,00	704,00	512,00	674,00	924,00	745,00	700,00	750,00	750,00	752,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	466,00	478,20	541,60	544,00	524,60	502,60	490,40	502,60	510,00	517,30	524,60	502,90
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	232,00	140?	210,00	250,00	240,00	200,00	160,00	200,00	155,00	160,00	140,00	190,00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,60	14,52	3,96	19,80	40,48	12,10	13,00	25,30	22,00	10,70	10,00	3,50
CO <sub>2</sub>	(122)	(64,40)	(83,0)	(80,0)		(109)	(121)	(116)	(115)	(93)	(98,0)	
H <sub>2</sub> S	(20)	(15,00)	(15,0)	(15,0)		(17,0)	(15,0)	(15)	(15)	(15)		
T.D.S.	2147,50	2075,15?	2156,98	2242,40	2009,66	2124,36	2312,40	2202,50	2111,50	2183,40	2231,40	2091,58
rMg/rCa	0,63	0,23	0,44	0,57	0,67	0,60	0,67	0,91	0,65	0,69	0,97	0,40
rNa/rCl	1,42	1,37	1,38	1,33	1,69	1,35	0,99	1,22	1,30	1,26	1,34	1,04
rSO <sub>4</sub> /rCl	0,25	0,14?	0,22	0,26	0,35	0,22	0,13	0,20	0,16	0,16	0,14	0,19
rNa/rK	119,09	109,20	99,04	101,54	110,91	107,10	85,50	91,61	88,45	91,44	31,4	84,46
Débit (m <sup>3</sup> /h)	13,60	12,24	12,24	10,20	10,24	10,20	10,20	10,20	11,128	12,20	12,24	

- d) Les valeurs considérables du rapport  $rNa/rK$  ont pour cause première la présence d'évaporites. Il en est de même pour le rapport  $rSO_4/rCl$  qui prend ainsi une valeur supérieure à celle de l'eau de mer qui est de 0,1.
- e) Le rapport  $rCl/rHCO_3$ , se situe vers 2,85; il est donc très loin de la valeur 10 admise par Revelle en cas de mélange d'eau douce avec de l'eau de mer (ce rapport vaut 230 pour l'eau marine).
- f) Le rapport  $rBr/rCl$  qui est égal à 0,015 pour l'eau de mer, se situe ici à un niveau inférieur avec 0,001.
- g) Le rapport  $rBr/rI$  concernant des éléments que l'on rencontre essentiellement dans l'eau de mer où il prend la valeur 2092,75 n'atteint que la valeur 73,06 pour les eaux thermominérales de Kyllini.
- h) Les valeurs prises par les rapports énumérés ci-dessus font clairement apparaître que les eaux thermominérales de la région de Kyllini ne sont pas en contact direct avec l'eau de mer, ou tout au moins, que l'influence marine est très discrète.
- i) La concentration en  $H_2S$  atteint de fortes valeurs. La provenance de ce gaz est due au phénomène classique de la réduction des sulfates. Dans le cas des eaux thermominérales de Kyllini, l'agent réducteur est fourni par les hydrocarbures que l'on peut observer même en surface, près de la source de Kyllini.
- j) Nous pouvons conclure en affirmant que les eaux thermominérales de Kyllini sont conditionnées par la tectonique cassante, qu'elles présentent une concentration chimique constante dans le temps, qu'elles proviennent des calcaires mésozoïques et qu'elles viennent au contact des évaporites durant leur parcours. Cette conclusion corrobore celle qui a résulté de l'étude des eaux thermominérales de la région de Kaiapha (G. A. KALLERGIS & N. J. LAMBRAKIS) et conduit à une vision d'ensemble des eaux thermominérales du Péloponnèse.

Tab. 3: Les caractéristiques physicochimiques de la source de Kyllini de 1893 à 1990.

	1893	1940	1962	1969	8/1976	5/1987	3/1989	3/1990
T °C		(24,80)			(25,00)	(23,90)	(24,00)	(22,90)
pH		(7,10)			(6,80)	(7,50)	(7,24)	(7,31)
E.C.							4150,00	4100,00
Ca <sup>2+</sup>	61,30	63,50	52,80	60,00	67,33	66,91	67,20	67,60
Mg <sup>2+</sup>	34,80	37,50	35,10	43,30	36,97	36,78	33,30	34,99
Na <sup>+</sup>	745,80	743,90	756,80	753,00	765,90	758,40	800,00	658,00
K <sup>+</sup>	12,00	15,80	63,00?	26,00	11,73	12,82	11,80	13,00
Cl <sup>-</sup>	930,30	910,30	883,20	913,00	936,10	932,20	914,00	980,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	54,24	54,37	615,90	569,00	533,14	536,30	530,00	574,62
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	176,50	190,40	219,50	225,00	217,10	202,15	150,00	190,00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>							12,80	27,90
CO <sub>2</sub>	14,70	54,40	47,40	37,40	7,20	62,70	118,00	
H <sub>2</sub> S		8,90	21,12	30,00	3,54	9,60	25,00	(30,00)
T.D.S.	1960,70	2015,77	2626,30	2589,30	2568,27	2545,56	2519,10	2546,11
rMg/rCa	0,95	0,98	1,10	1,20	0,92	0,92	0,82	0,85
rNa/rCl	1,24	1,26	1,32	1,27	1,26	1,26	1,35	1,04
rSO <sub>4</sub> /rCl	0,14	0,15	0,18	0,18	0,17	0,16	0,12	0,14

### 3. Le régime géothermal du Péloponnèse occidental

#### 3.1. Généralités

Les sites principaux des eaux thermominérales du Péloponnèse occidental sont au nombre de huit. Les eaux possèdent une concentration en sels et une température supérieure à celles des eaux douces. Dans tous les cas, un relachement plus ou moins grand d'hydrogène sulfuré ( $H_2S$ ) indique que ces eaux sont, elles aussi, sulfureuses.

Topographiquement, les sources d'eaux thermominérales s'alignent le long des côtes du Péloponnèse occidental. Géologiquement, elles présentent l'aspect suivant (fig. 1):

- Les sources de Kounoupele (+50 m)<sup>3)</sup> et Kaiapha (+100 m) jaillissent soit à la base, soit à l'intérieur des calcaires mésozoïques, lesquels appartiennent à la zone de Tripolitza à Kaiapha et à la zone Ionienne à Kounoupele. D'après G. A. KALLERGIS & N. J. LAMBRAKIS et d'autres auteurs, les eaux thermominérales de Kaiapha, remontent vers la surface sous l'effet de la chaleur et des enrichissements en gaz (thermoartésianisme) après avoir effectué un parcours à grande profondeur à travers les fractures et les failles affectant notamment les roches carbonatées. Il semble ainsi que le fonctionnement et l'alimentation de ces sources soient analogues à ceux des sources de Kyllini.
- Les sources de Kyllini (400 m), Lechaina (3000 m), Strepheion (7000 m), Traganon (7500 m) et de Bromonerie Pylou (50 m), jaillissent dans des formations néogènes exactement semblables à celles décrites au paragraphe 1.2..

#### 3.2. Description hydrochimique des sources

Les diagrammes de Piper représentés sur la figure 2 indiquent que les sources peuvent être classées selon deux grandes catégories hydrochimiques:

##### a) Sources à teneur en chlorure de sodium, potassium et sulfate

Les sources principales sulfureuses du Péloponnèse occidental appartiennent à cette catégorie (sources de Kaiapha et de Kyllini). On peut également y placer les sources de Kounoupele et de Lechaina.

##### b) Sources à teneur en bicarbonate de calcium et de magnésium

Les sources de Strepheion, Traganon et Bromonerie Pylou figurent dans cette catégorie.

En nous basant sur les données du tableau 4 nous pouvons faire les observations suivantes:

- 1) Le rapport  $rCl/rHCO_3$ , atteint de fortes valeurs pour les sources de Kounoupele et de Kaiapha (respectivement 159,8 et 61,73), ce qui montre l'influence de l'eau de mer. Celle-ci est confirmée par la valeur du rapport  $rNa/rCl$  qui est de 0,85 pour l'eau de mer et de 0,87 et 1,03 respectivement pour les sources de Kounoupele et de Kaiapha. Ceci s'explique par la nature fortement perméable des roches (calcaires) au sein desquelles les sources jaillissent et par la faible distance qui sépare les sources de la mer.

<sup>3)</sup> Les distances des sources de la mer sont inscrites entre parenthèses.

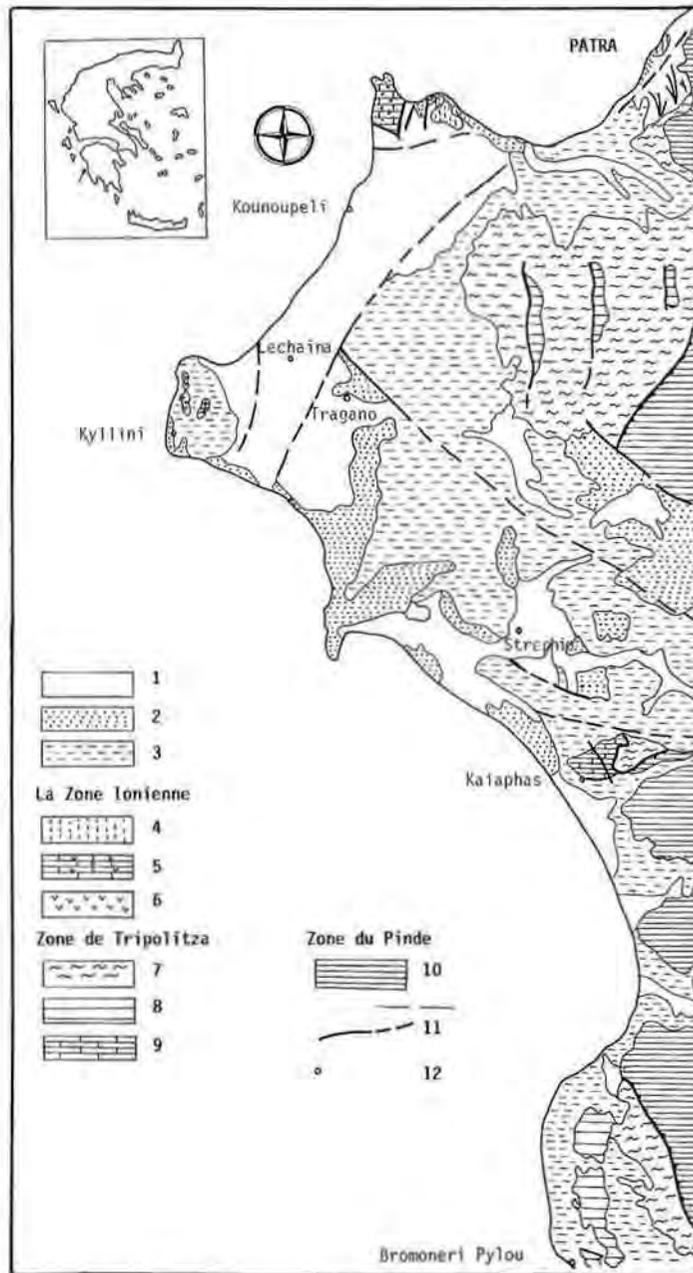


Fig. 1: Extrait de la carte géologique de la Grèce à 1 : 500 000, I.G.M.E., 1983. 1, Dépôts alluviaux récents. 2, Pleistocène (sables, conglomérats, argiles d'origine fluvio-lacustre). 3, Pliocène (conglomérats, sables, argiles, marnes, calcaires marneux d'origine lacustre). 4, Flysch. 5, Senonien supérieur (calcaires biomicrudites). 6, Trias (gypses). 7, Flysch. 8, Paléocène (calcaires biomicrites). 9, Crétacé supérieur (calcaires micrudites). 10, Calcaires avec le premier flysch. 11, Failles. 12, Les sites d'eau thermominérale.

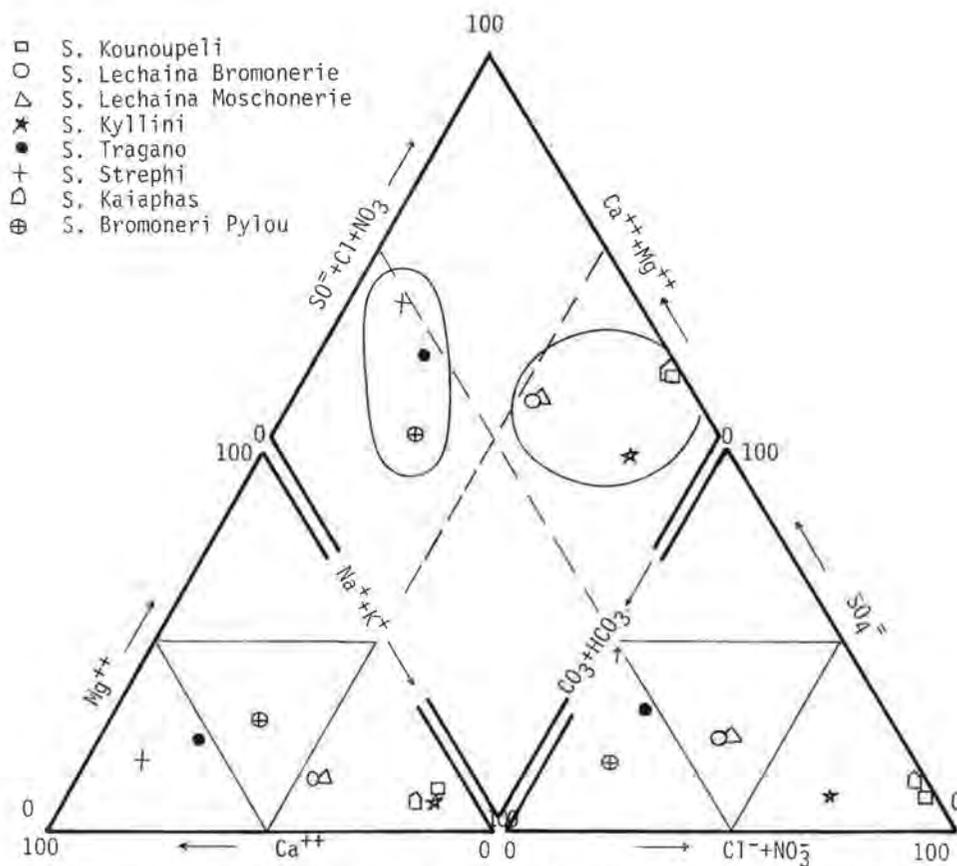


Fig. 2: Diagramme de Piper montrant la composition chimique des sources thermominérales du Péloponnèse occidentale.

Un problème se pose dès lors: étant donné la variation du débit des sources en fonction de leur alimentation en eaux douces et du mélange avec les eaux de mer, pourquoi la composition chimique demeure-t-elle constante? Il résulte de l'étude des sources de Kaiapha (G. A. KALLERGIS & N. J. LAMBRAKIS) que leur débit a subi des variations importantes ces dernières années. Ainsi, en 1988, il était de l'ordre de 300 m<sup>3</sup>/h tandis qu'en 1989, il n'était plus que de 100 m<sup>3</sup>/h.

Malgré cette diminution du débit, la composition chimique des eaux thermominérales demeure constante. Aussi pensons-nous que la participation de l'eau de mer est analogue à celle de l'eau douce car il y aurait dans le cas contraire une modification de la composition chimique des eaux thermominérales. Nous en déduisons que le mécanisme du fonctionnement des sources est tel que la proportion du mélange des eaux marines avec les eaux thermominérales demeure constante, ce qui entraîne la constance corrélatrice de la composition chimique.

- II) Il résulte de l'examen du rapport  $rMg/rCa$  que les eaux thermominérales proviennent de roches carbonatées (rapport variant entre 0,7 et 0,85). Les écarts que l'on observe dans les cas des sources de Strephion, de Traganon et de

Tab. 4: Les sources principales d'eau thermominérale du Péloponnèse occidentale. 1) Source de „Kounoupele“, 2) Source de „Bromoneri Lechainon“, 3) Source de „Moschoneri Lechainon“, 4), Source de „Kyllini“, 5) Forage de Arrani en Kyllini, 6) Source de „Tragano“, 7) Source de „Stephio“, 8) Source de „Kaiapha“, 9) Source de „Bromoneri pylou“.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Eau de mer (meq/l)
T °C	(28,00)	(28,00)		(24,00)	(26,20)	(29,50)	(21,50)	(33,80)	(21,00)	
pH	(7,0)	(7,9)		(7,24)	(7,55)	(8,25)	(6,80)	(7,05)	(6,75)	
E.C.				4150,00				28200,00	3330,00	
Ca <sup>2+</sup>	897,80	120,24	123,70	67,20	98,00	41,34	311,02	700,00	248,50	19,96
Mg <sup>2+</sup>	773,40	37,94	38,00	33,30	40,90	20,43	51,07	355,00	110,17	111,05
Na <sup>+</sup>	10189,00	248,40	224,40	800,00	742,00	31,74	54,74	5501,60	230,00	456,75
K <sup>+</sup>	391,00	0,77		11,80	12,05	5,86	5,86	125,58	3,13	9,72
Cl <sup>-</sup>	17942,00	248,22	244,80	914,00	994,00	39,00	70,92	8240,00	788,98	536,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	193,90	493,20	439,80	530,00	599,00	211,06	517,28	229,36	380,64	2,33
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2308,30	273,80	233,60	150,00	191,00	101,52	565,31	2175,00	187,80	56,21
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				12,30				237,60		
Br <sup>-</sup>				2,30				8,64		0,81
I <sup>-</sup>				0,05				0,27		0,0004
T.D.S.	32695,90	1422,60	1304,30	2521,45	2676,95	480,90	1576,20	17572,45	1958,22	
H <sub>2</sub> S	0,17	0,20		(25,00)	(15,00)	(0,20)	(0,08)	(30,00)	(1,73)	
rMg/rCa	0,70	0,52	0,82	0,82	0,70	0,50	0,27	0,85	0,79	5,56
rNa/rCl	0,87	1,54	1,35	1,35	1,15	1,26	1,19	1,03	0,45	0,85
rSO <sub>4</sub> /rCl	0,09	0,90	0,12	0,12	0,14	1,92	5,89	0,19	0,17	0,10
rCl/rHCO <sub>3</sub>	158,99	0,86	0,95	2,90	2,85	0,32	0,23	61,73	3,56	230,04
rBr/rCl				0,001				0,005		0,015
rBr/rI				73,06				50,00		2032,75

Lechaina, peuvent être attribués au mélange des eaux thermominérales avec les eaux douces dont la valeur du rapport  $rMg/rCa$  est de 0,25.

III) En examinant le rapport  $rSO_4/rCl$ , il est clair que les eaux thermominérales viennent au contact d'évaporites puisque la valeur du rapport se forme à des niveaux supérieurs à ceux de l'eau de mer.

IV) En se basant sur les paragraphes précédents et sur le diagramme de Piper (fig. 2) et après avoir tenu compte des distances des sources de la côte nous pouvons encore effectuer les observations suivantes:

Les sources de Traganon, et de Strephton qui appartiennent au groupe à teneur en bicarbonate de calcium et de magnésium sont situées à 7,5 km et à 7,0 km des côtes. Les eaux des sources de Lechaina qui sont à environ 3 km des côtes tendent vers ce groupe. Pour le reste des sources les distances restent au dessous de 0,5 km. Ainsi, si nous acceptons que les champs principaux des eaux thermominérales de Kyllini et de Kaiapha sont liés aux failles principales parallèles aux côtes qui ont contribué à leur formation, comme le reconnaissent d'ailleurs tous les auteurs, nous devons accepter que la présence du reste des sources est liée à des anomalies tectoniques secondaires à travers lesquelles se diffusent les eaux thermominérales pour résurgir après avoir été diluées par des eaux douces. Les valeurs du rapport  $rMg/rCa$  des sources de Strephton, de Traganon et de Lechaina inclinent dans ce sens, comme nous l'avons déjà vu dans le schéma général.

Cela explique l'existence de beaucoup de sources dites „sources de cure“, lesquelles n'ont pas les caractéristiques physicochimiques des sources d'eaux thermominérales étant donné la proportion d'eau douce dans le mélange eau thermominérale-eau douce qui couvre ces caractéristiques. On peut admettre que ces sources ont pu être formées dans les mêmes conditions que les sources principales, néanmoins la situation géologique et tectonique dans leurs bassins versants ne confirme pas cette théorie.

## Résumé

Les conditions de fonctionnement des sources de Kyllini ainsi que leur caractère hydrochimique sont examinés dans le présent travail. Il ressort de notre étude que ces eaux de sources appartiennent au groupe des eaux à teneur en chlorure de sodium, potassium et sulfate, et que leur composition chimique demeure constante dans le temps. L'étude des rapports  $rCl/rHCO_3$  et  $rBr/rI$  a montré que les eaux thermominérales de la région de Kyllini ne subissent pas l'influence des eaux de mer. L'existence des sources est liée à la présence de failles orientées N.S.

L'étude hydrochimique comparative des sources thermominérales du Péloponnèse occidental a montré qu'il y avait deux catégories de sources. La première englobe les sources principales aux eaux à teneur en chlorure de sodium, potassium et sulfate qui sont situées sur des failles majeures de direction parallèle aux côtes. La seconde catégorie comprend les sources secondaires aux eaux à teneur en bicarbonate de calcium et de magnésium; elles sont alimentées par de faibles quantités d'eaux thermominérales diffusées par des failles mineures, transversales aux précédentes. Les sources d'eaux thermominérales de Kyllini et Kaiapha sont typiques du régime géothermal du Péloponnèse occidental et sont liées au système de failles parallèles au littoral.

## Bibliographie

- Anonyme (1966): Villes d'eaux hydrominérales. – EOT Athènes (en grec).
- CHRISTODOULOU, G. (1971): Les dépôts néogènes de la région de Kyllini (Péloponnèse du NW). – Etudes spéciales, I.G.M.E. N° 11, Athènes (en grec).
- DIMOPOULOS, G. & D. PATRAS (1988): Des études hydrogéologiques et hydrochimiques de la région de Kyllini. – 40<sup>ème</sup> Con. Soc. Geol. de Grèce, Athènes (en grec).
- ELEUTHERIOU, A. (1971): La reconnaissance hydrogéologique de la source de Kyllini. – Rapport non publié, I.G.M.E., Athènes (en grec).
- KALLERGIS, G. A. & N. J. LAMBRAKIS: Contribution à l'étude des sources thermominérales de Grèce. Les sources thermominérales de Kaiapha. – Sous publication.
- KISKYRAS, D. (1962): Les sources thermominérales du Péloponnèse. – Le jour de l'année péloponnésien, 103–109, Athènes (en grec).
- KISKYRAS, D. & A. PAPAYANNOPOULOU (1976): Les sources sulfureuses du Péloponnèse occidental. – Proc. Int. Congr. Thermal. Wat., geoth. energy vulcan of Med. area, vol. 2, 579–618, Athènes.
- KISKYRAS, D. (1989): Les sources minérales d'Elide. – B. Congr. local des études d'Elide, Amalias, 13–15 Novembre, vol. 1, 81–96, Athènes (en grec).
- ORPHANOS, G. (1976): Etude de reconnaissance des sources thermominérales de Kyllini, Kaiapha, Thermopulon, Ypatis. – I.G.M.E., Athènes (en grec).
- PERTESIS, M. (1951): La stabilité de la composition chimique et de la température des sources thermominérales de Grèce. – Bull. Acad. de Grèce, vol. 26, 25–38, Athènes (en grec).

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Entwässerungsmechanismen und hydrochemischen Charakteristika der Quellen von Kyllini untersucht. Die Studie zeigt, daß diese Quellwässer zur Gruppe der Natrium-Kalium-Chlorid-Sulfatwässer gehören und zeitlich konstante chemische Zusammensetzung aufweisen. Die Untersuchung der Verhältnisse  $rCl/rHCO_3$  und  $rBr/rI$  zeigte, daß die Thermalwässer der Region von Kyllini nicht durch Meerwasser beeinflusst werden. Der Austritt der Quellen ist an N-S-streichende Störungen gebunden.

Die vergleichende hydrochemische Untersuchung der Thermalwässer des westlichen Peloponnes zeigte, daß es zwei Kategorien von Quellen gibt. Die erste beinhaltet die Hauptquellen mit Wässern des Natrium-Kalium-Chlorid-Sulfat-Typs, die entlang der parallel zur Küste verlaufenden Hauptstörungen austreten. Die zweite Gruppe besteht aus den Nebenquellen des Calcium-Magnesium-Bikarbonat-Typs. Sie werden durch geringere Mengen Thermalwasser aus den transversalen Nebenstörungen gespeist. Die Thermalwässer von Kyllini und Kaiapha sind typisch für das geothermale Regime des westlichen Peloponnes und stehen in Zusammenhang mit dem parallel zur Küste verlaufenden Störungssystem.

## Summary

The present paper deals with the functioning mechanism of Kyllini thermal-mineral spring (N Western Peloponnesos) and its hydrochemical character. The spring belongs to the chloride-sodium, sulfate hydrochemical type. The ratios  $rCl/rHCO_3$  and  $rBr/rI$  suggest that the neighboring sea does not significantly influence the chemical character of the water. The spring is manifested on a N-S striking fault system.

The comparative hydrochemical investigation revealed the presence in Western Peloponnesos of two types of thermal-mineral springs: the chloride-sodium sulfate type to which belong the most important hydrothermal manifestations and the less important manifestations of the

bicarbonate-magnesium type. The first hydrochemical type is closely related to the main fault system parallel to the coast of Western Peloponnesos.

The second hydrochemical type is related to the secondary fault system orthogonal to the main system. The hydrothermal fluids of this type are secondary seepages through these fault systems.

The thermal-mineral springs of Kyllini and Kaiapha are typical of the geothermal regime of Western Peloponnesos, the latter being in close relation with the main fault system parallel to the coast.