

Écoulements en milieu karstique. Quelques données du karst hellénique

Abflüsse im Karstmilieu. Ergebnisse aus dem griechischen Karst

G. SOULIOS¹⁾

Inhalt

	Seite
1. Généralités	123
2. Données du forage 14A de Vrysia (Théssalie)	125
3. Données des forages ΥΓ ₁ -ΥΓ ₂ d'Aghia (Crète).....	127
4. Données de piézométrie du domaine d'Aghia	130
5. Discussion – Conclusions.....	131
Résumé	131
Bibliographie.....	132
Zusammenfassung	132
Summary	132

1. Généralités

I. Le karst, examiné comme milieu d'écoulement d'eau souterraine, présente certaines caractéristiques ou certaines particularités dont l'importance et l'efficacité sur l'écoulement sont échelonnées d'après le degré de la fissuration et de la karstification. Le milieu karstique, d'après A. MANGIN (1984), est „hétérogène quelle que soit l'échelle, discontinu et non équiprobable“. Nous pensons que cette généralisation ne correspond tout à fait à la réalité et elle ne couvre pas beaucoup de karsts. Il y a des karsts qui en moyenne ou en grande échelle, montrent une homogénéité, une continuité ou quasi-continuité et une équiprobabilité. Or on peut dans beaucoup de cas, si non dans la plupart, établir des lois d'écoulement, et, bien sur, déterminer les limites de validité de ces lois dans la zone saturée d'un karst.

II. L'étude des écoulements dans les fissures ou les conduits par C. LOUIS (1968) a mené à la détermination des diverses catégories et des divers domaines (I-V) de la fig. 1 et à la précision des lois qui régissent ces domaines. Ce qui importe aux écoule-

¹⁾ Georges SOULIOS, Département de Géologie et de Géographie Physique, Université de Thessalonique, 54006-Thessalonique-Grèce.

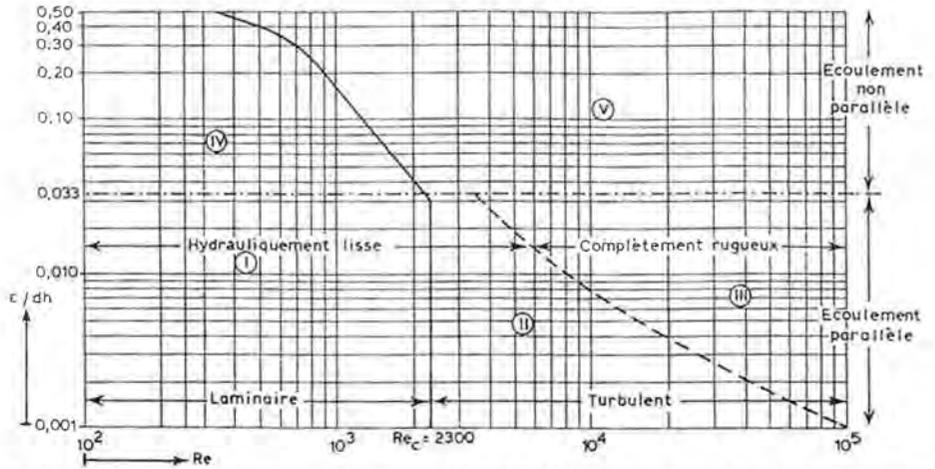


Fig. 1: Catégories des écoulements et domaines de validité des lois d'écoulement dans les fissures ou les conduits (d'après C. LOUIS, 1968). ϵ/dh = rugosité relative, Re = nombre de Reynolds.

ments en milieu karstique est la loi (ou les lois) de perte de charge (p.c.). Les travaux de: G. MARJOLET & J. SALADO (1975), C. CHAUVETEAU (1965), C. DROGUE (1969), M. GOTTIS & C. DROGUE (1983), A. MANGIN (1984), I. MÜLLER & J. G. ZÖTL (1980), L. KIRALY (1969), A. BURGER (1983) e.a. ont donné des résultats intéressants. En effet, on admet aujourd'hui que de façon générale entre la vitesse d'écoulement V et le gradient hydraulique i (qui représente les pertes de charge) il y a les relations (v. aussi fig. 1):

$$V = ki \text{ (p.c. linéaires, domaines I et IV)} \quad (1)$$

$$V = k'i^{1/2} \text{ (p.c. quadratiques, domaines III et V)} \quad (2)$$

$$V = k'i^n \text{ (} 0,5 < n < 1 \text{) (p.c. exponentielles, domaine II)} \quad (3)$$

où k = perméabilité de DARCY, k' = perméabilité „turbulente“. Le troisième cas (3) est un cas „intermédiaire“.

Il est évident que la linéarité des pertes de charge par rapport à la vitesse d'écoulement et par conséquent la validité de la loi de DARCY (H. DARCY, 1856), théoriquement peut être valable dans les domaines I et IV (écoulement laminaire), sans tenir compte de l'effet d'inertie. Si on tient compte de ce dernier on aura une partie aux limites des domaines I et VI, fig. 2, où on peut observer un écoulement laminaire mais à p.c. quadratiques entre Re_c (= Re -critique) et Re_l (= Re -limite), d'après G. MARJOLET & J. SALADO (1975). Ces auteurs ont tracé aussi la ligne de Re_c (entre les domaines I et V) pour des valeurs fortes de rugosité relative: $0,5 < \epsilon/dh < 1,8$, c'est à dire ils ont complété le diagramme de la fig. 1.

Pourtant des questions restent en ce qui concerne la transition du domaine de p.c. linéaires au domaine de p.c. quadratiques surtout dans des karsts assez discontinus et hétérogènes et c'est ici qu'on a besoin de nouvelles données qui peuvent contribuer à une meilleure connaissance de ces écoulements. Il semble en effet que cette transition ne se fait pas de façon „ponctuelle“, mais „progressive“ à l'intercalation d'une zone „exponentielle“. C'est celle-ci, qui est le sujet principal de ce travail qui fait partie d'une étude plus vaste concernant l'Hydrogéologie du karst hellénique (G. SOULIOS, 1985).

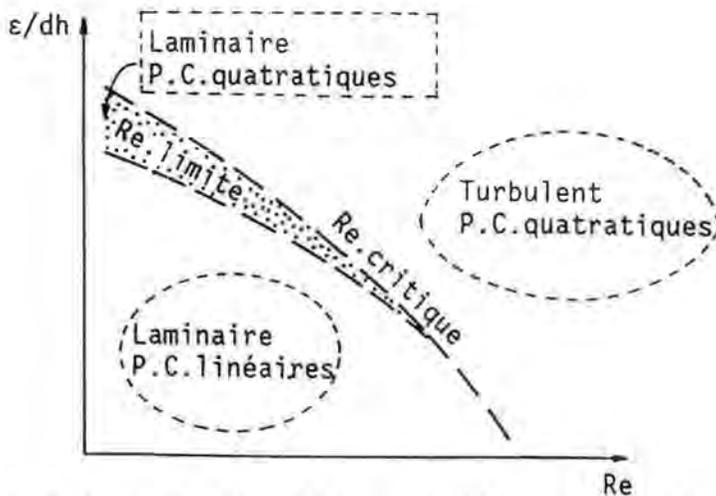


Fig. 2: Limites des domaines d'écoulement laminaires et turbulents en fonction de la rugosité relative (d'après G. MARGÉLOT & J. SALADO, 1975).

2. Données du forage 14A de Vrysia (Théssalie)

I. Ce forage se trouve près du village Vrysia (Théssalie), fig. 3 et il a été fait en 1976 dans un programme d'exploitation des eaux souterraines de Théssalie. Il a une profondeur de 70 m, un diamètre de 24" et tubage de 16". Il traverse 4 m de couverture alluviale et puis des calcaires du Crétacé supérieur.

Ce forage a été pompé d'abord en palier à débits successifs $Q_1 = 260 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_2 = 340 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_3 = 420 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_4 = 510 \text{ m}^3/\text{h}$. À partir des données de ce pompage en palier on a fait le diagramme rabattement s -log t (t = temps de pompage), fig. 4.

Par application de la méthode classique de C. JACOB (1946), on calcule les valeurs suivantes pour la transmissivité hydraulique T : $T_1 = 2,54 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_2 = 2,48 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_3 = 2,37 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, $T_4 = 2,28 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ (pour Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 correspondant). On constate donc une diminution progressive de la valeur de T d'autant que le débit Q augmente. Si on trace des courbes rabattement s -débit Q pour diverses valeurs du temps t de pompage ($t_1 = 30 \text{ min}$, $t_2 = 50 \text{ min}$, $t_3 = 100 \text{ min}$, v. fig. 5), on observe que la linéarité existe jusqu'à un débit de $460 \text{ m}^3/\text{h}$ indépendant du temps t . D'ailleurs si on trace la courbe transmissivité T -débit Q (fig. 6), on observe aussi que la linéarité existe également jusqu'à un débit de $460 \text{ m}^3/\text{h}$.

II. Quelle pourrait-être l'interprétation de ce comportement du forage étudié? Où est-ce due la diminution de T ? Il y a trois explications possibles:

- Diminution de T à cause d'une diminution de l'épaisseur de la nappe pompée. Dans notre cas, le rabattement maximal de 0,30 m devant l'épaisseur totale de la nappe (plus de 70 m) exclut sans doute cet effet.
- Pertes de charge anormales dans le forage pompé. Celà, en effet, pourrait se passer. Mais dans un forage de diamètre de 24" à un rabattement total de l'ordre de 0,10-0,30 m cette explication semble très peu probable ou possible.
- Changement du régime d'écoulement: C'est à dire transition du régime des p.c. linéaires aux p.c. quadratiques. Cette transition se fait de façon „progressive“ et

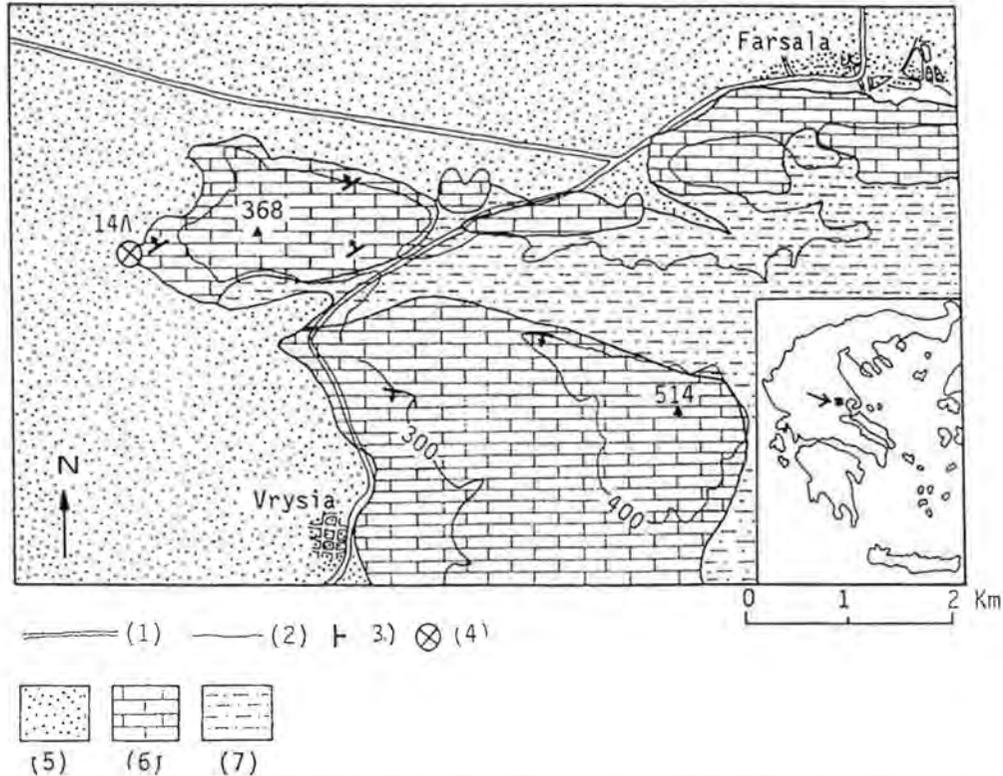


Fig. 3: Carte géologique du domaine du forage 14A de Vryisia. (1) réseau routier, (2) isohypses, (3) pendage-direction des couches, (4) forage 14A, (5) formations quaternaires, (6) calcaires – Crétacé sup., (7) formation schiste-radiolaritique aux ophiolites – Jurassique sup. (d'après J. BORNOVAS & N. PHILIPPAKIS, 1969, et des observations de l'auteur).

non „ponctuelle“ à cause d'une compensation statistique dans le karst. Parce que dans le karst on rencontre des fissures, des conduits et des chenaux de diamètres différents et de rugosités différentes et ainsi l'écoulement change ou rétro-change de régime en courtes distances. Si le débit (et par conséquent la vitesse d'écoulement) augmente on passe nettement au régime quadratique qui se réalise à débit

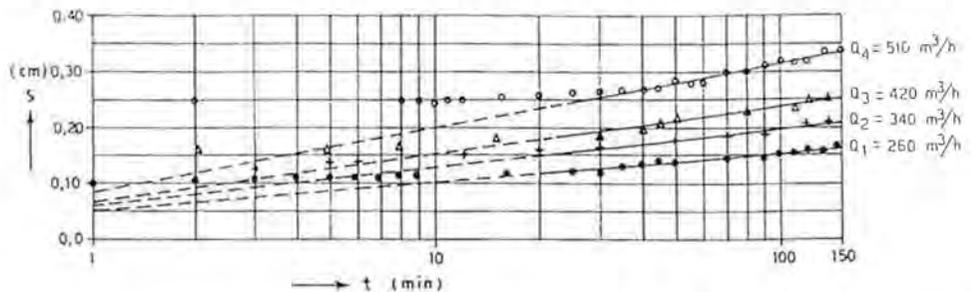


Fig. 4: Diagrammes s-log t pour le forage 14A de Vryisia. $Q_1 = 260 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_2 = 340 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_3 = 420 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_4 = 510 \text{ m}^3/\text{h}$.

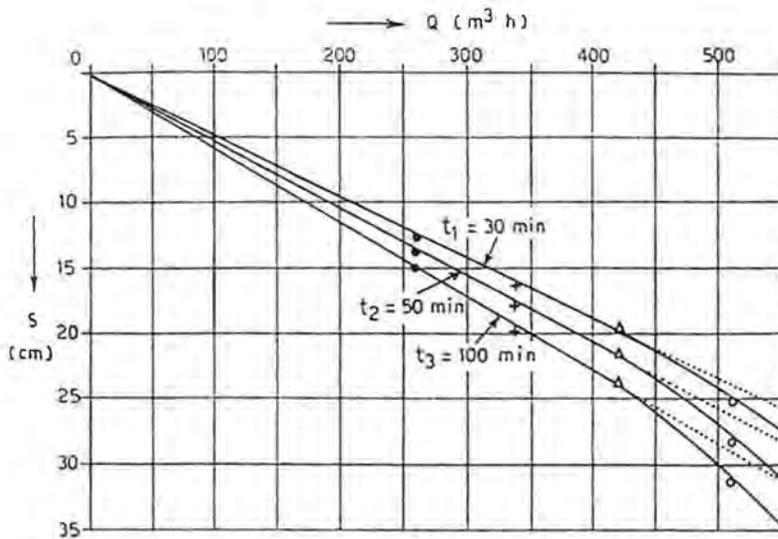


Fig. 5: Courbes s - Q pour le forage 14 Λ de Vryisia.

$Q > 460 \text{ m}^3/\text{h}$. La conséquence de cette transition est la diminution fictive de T , d'abord linéaire, puis non linéaire. La diminution de T est la transcription mathématique du changement (progressif) du régime d'écoulement.

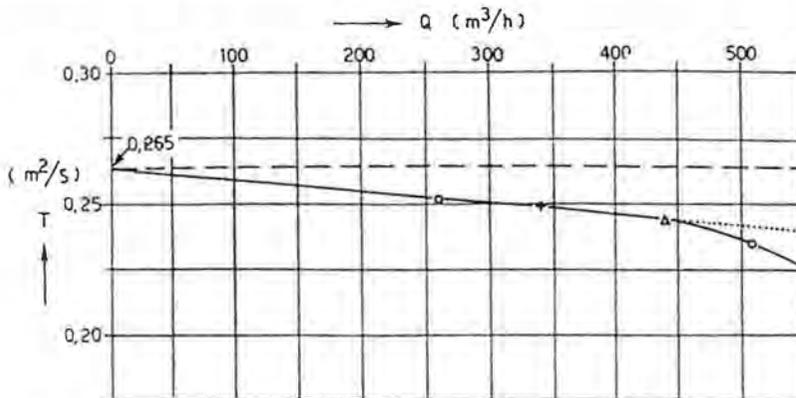


Fig. 6: Courbes T - Q pour le forage 14 Λ de Vryisia.

3. Données des forages $\Upsilon\Gamma_1$ - $\Upsilon\Gamma_2$ d'Aghia (Crète)

I. Autour de la source d'Aghia (Crète occ., fig. 7), il y a un certain nombre de forages et de piézomètres, creusés dans un calcaire conglomératique très karstifié. En deux forages les n° $\Upsilon\Gamma_1$ et $\Upsilon\Gamma_2$ (à profondeur 90 m et à diamètre crépiné 16') il a été réalisé contemporanément un pompage d'essai assez long (du 5/10/76 au 20/10/76) portant 3 paliers: un à débit $Q_1 = 530 \text{ m}^3/\text{h}$, un à $Q_2 = 720 \text{ m}^3/\text{h}$ et un à

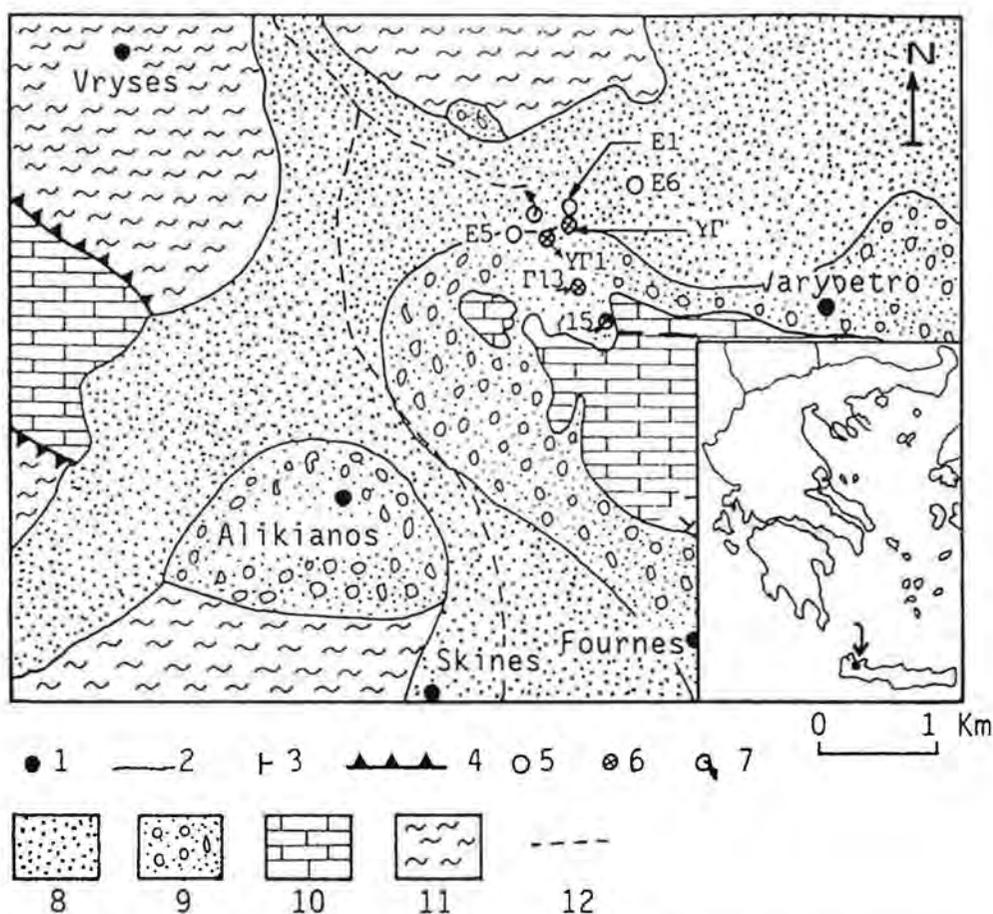


Fig. 7: Carte géologique du domaine de la source d'Agbia (Crète). 1 village, 2 ligne de contact géologique, 3 pendage-direction des couches, 4 ligne de chevauchement, 5 piézomètre, 6 forage, 7 source, 8 formations quaternaires (argiles etc.), 9 formations du Neogène (conglomérats etc.), 10 calcaire conglomératique (Jurassique-Crétacé?), 11 série de phyllites-quartzites (permotriassique?), 12 cours d'eau.

$Q_3 = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$ (à chaque forage). La descente du niveau a été suivie aux piézomètres E_5 et E_1 et même dans les forages pompés. Le piézomètre E_5 se trouve presque sur la ligne $Y\Gamma_1 - Y\Gamma_2$ et à distance de 110 m de $Y\Gamma_1$ et de 160 m de $Y\Gamma_2$. Etant donné que la nappe karstique pompée a une très forte diffusivité ($= T/S$), l'influence des forages pompés arrivait à E_5 très vite et à une très petite différence de temps.

II. La fig. 8 représente le diagramme $s\text{-log } t$ de E_5 . Par application de la méthode de C. JACOB (1946), avec une petite approximation, on calcule les valeurs de la transmissivité hydraulique $T_1 = 5,2 \times 10^{-1} \text{ m/s}$, $T_2 = 3,8 \times 10^{-1} \text{ m/s}$, $T_3 = 1,1 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ (pour $Q_1 = 530 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_2 = 720 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_3 = 1200 \text{ m}^3/\text{h}$ réciproquement).

On constate bien donc et dans ce cas que l'augmentation du débit Q implique une diminution de la transmissivité hydraulique T . À la fig. 9 on a le diagramme qui semble être réctiligne jusqu'au débit pompé.

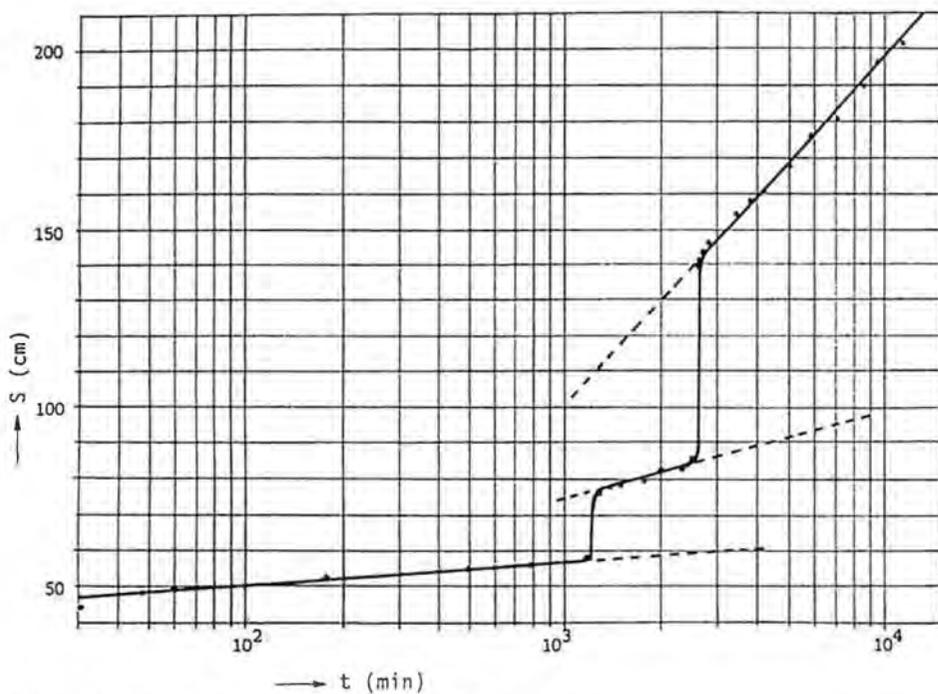


Fig. 8: Diagramme s-log t pour le piézomètre E_5 (v. texte).

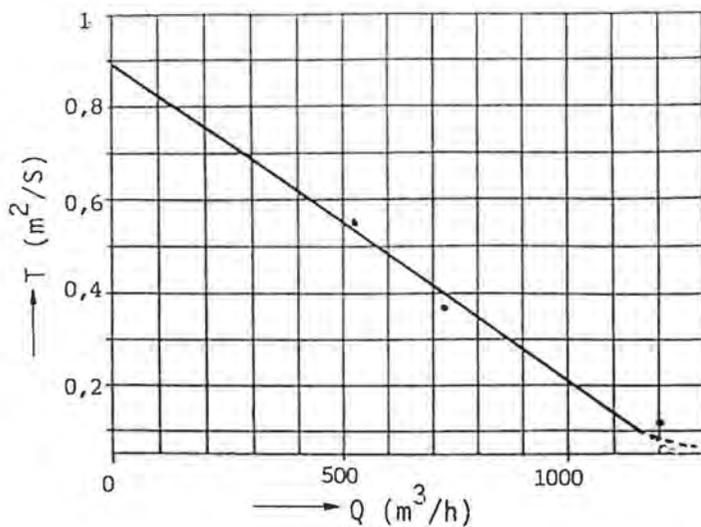


Fig. 9: Diagramme T-Q pour le piézomètre E_5 (v. texte).

III. Dans ce cas le rabattement est mesuré dans un piézomètre, or on n'a pas de perte de charge anormale, comme quand on le mesure dans le forage pompé. Par conséquent la diminution fictive de la transmissivité hydraulique transcrit, en effet,

la transition progressive du régime des p.c. linéaires au régime des p.c. quadratiques, ou bien marque une zone „exponentielle“ à n fort (p.e. $1 > n > 0,8$), v. relation (3). La progressivité de transition doit se rapporter à la compensation statistique, étant donné que dans le karst on rencontre des fissures, des conduits et des chenaux de diamètres différents et de rugosités différentes et ainsi l'écoulement peut changer de régime en courte distance.

D'ailleurs le piézomètre E_1 (à 10 m de $\Upsilon\Gamma_1$ et à 60 m de $\Upsilon\Gamma_2$) a montré une évolution pareille à celle du piézomètre E_5 et en plus que la linéarité de la fig. 9 n'existe pas à fort débit ($1200 \text{ m}^3/\text{h}$), peut-être à cause du passage complet au régime quadratique.

4. Données de piézométrie du domaine d'Aghia

I. Comme on a déjà noté, près de la source d'Aghia, il y a un nombre de forages et de piézomètres à diverses distances d'elle. On peut admettre à une certaine approximation, que le fonctionnement de la source ressemble au fonctionnement d'un

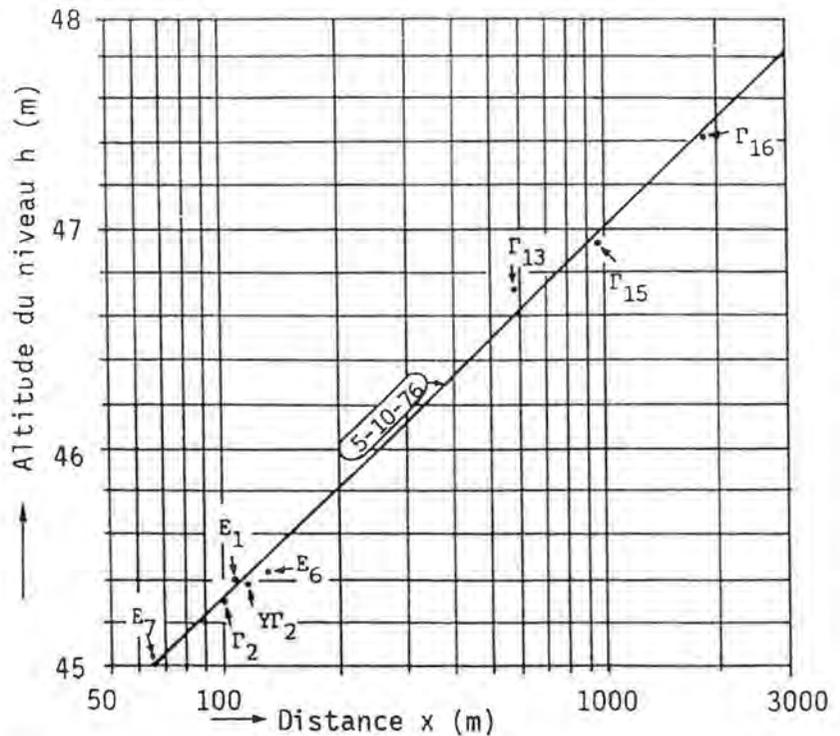


Fig. 10: Diagramme h - $\log x$ du domaine de la source d'Aghia.

forage pompé (en ce qui concerne les écoulements en amont de la nappe drainée). C'est même à cette base théorique que B. MIJATOVIC (1974) a établi la méthode de la calcul de la transmissivité hydraulique d'une nappe karstique (ou non) drainée

par une source. À base de cette admission, d'après le modèle de C. JACOB (1946) et la formule consécutive d'approximation logarithmique, le rabattement s en un moment donné est une fonction de la forme

$$s = f(\log x) \quad (4)$$

où x = la distance entre un point considéré et le puits pompé, ici la source débitante. Or, à un papier sémi-logarithmique la fonction (4) se représente par un diagramme réctiligne.

À base des mesures détaillées du niveau dans les forages et les piézomètres qui entourent la source d'Aghia, on a tracé le diagramme $h-\log x$ de la fig. 10 (h = l'altitude absolue du niveau au point considéré). Il est évident qu'il existe une linéarité $h-\log x$ ($\approx s-\log x$), qui suppose la validité de la formule d'approximation logarithmique de C. JACOB (1946). Par conséquence cette linéarité suppose la validité de la loi de H. DARCY (1856) dans le karst étudié.

5. Discussion – Conclusions

I. Le pompage d'essai à deux forages karstiques a montré une diminution de la transmissivité hydraulique T . La diminution est, au moins au début, linéaire par rapport au débit Q .

II. Cette diminution n'est pas réelle parce qu'elle ne correspond pas à de changement ou à de variation des caractéristiques intrinsèques du karst. Elle est fictive et elle trahit la transition de l'écoulement du régime des p.c. linéaires au régime des p.c. quadratiques. Il semble que cette transition ne se fait pas de façon „ponctuelle“, mais de façon „progressive“ exactement à cause d'une compensation statistique des effets de l'hétérogénéité (à petite échelle) des fissures, des conduits et des chenaux qui provoque des changements et des rétrochangements du régime de l'écoulement à courtes distances.

III. Dans le cas de l'écoulement en régime de transition, on dirait en régime „transitoire“ la loi des p.c. doit correspondre à la forme (equ. 3):

$$V = k'i^n$$

où n assez plus grand que 0,5 ($n \gg 0,5$) et assez près de 1. C'est à dire $n = 0,9-0,8$ et cela parce que les diagrammes de forme $s/\log t$ qui résultent du pompage, après une certaine valeur du temps du pompage t , c'est à dire à conditions de validité de la formule de C. JACOB (1946), sont réctilignes. On ne pourrait pas avoir cette forme réctiligne si n était près de 0,5.

IV. Dans le cas de la source d'Aghia le diagramme $s/\log x$ (sous conditions de non influence), est réctiligne, c'est qui indirectement suppose la validité de la loi de DARCY. Ce diagramme correspond à des gradients hydrauliques i de 1% à 1‰ (moyen 1‰). Il est bien attendu que la loi de linéarité des p.c. aux écoulements à un tel faible gradient hydraulique soit valable.

Résumé

Dans ce travail on présente quelques données concernant les écoulements en milieu karstique. Il s'agit des données des pompages d'essai aux forages 14A de Vrysia (Thés-

salie) et de $\Upsilon\Gamma_1$ - $\Upsilon\Gamma_2$ d'Aghia (Crète) et de piézométrie autour de la source d'Aghia. Le traitement des données de pompage a montré que la valeur de la transmissivité hydraulique T se diminue avec l'augmentation du débit. D'ailleurs la piézométrie autour de la source d'Aghia a montré un régime de pertes de charge linéaires. On discute et on essaie d'interpréter ces données.

Bibliographie

- BORNOVAS, J. & N. PHILIPPAKIS (1969): „Geological map of Greece, Farsala sheet.“ – Ed. Inst. for Geology and Subsurface Research, Athens.
- BURGER, A. (1983): „Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura.“ – Gaz – Eaux – Eaux Usées, fasc. 9, 533–583, Zürich.
- CHAUVETEAU, C. (1965): „Essai sur la loi de DARCY et les écoulements laminaires à perte de charge non linéaire.“ – Thèse de Doct. Ing., 203 p, Toulouse.
- DARCY, H. (1856): „Les fontaines publiques de la ville de Dijon.“ – 56 p, Victor Dalmot, Paris.
- DROGUE, C. (1969): „Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'après d'exemples de quelques karsts périméditerranéens.“ – Thèse d'Etat, 482 p, Univ. de Montpellier.
- GOTTIS, M. & C. DROGUE (1983): „Le milieu fissuré.“ – Hydrogéologie-Géologie de l'ingénieur, fasc. I, 17–23.
- JACOB, C. (1946): „Drawdown test to determine effective radius of artesian well.“ – Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., No 72, 620–646.
- KIRALY, L. (1969): „Statistical analysis of fractures (orientation and density).“ – Geol. Rundschau, 59, 125–151.
- LOUIS, C. (1968): „Étude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leurs écoulements sur la stabilité des massifs rocheux.“ – E.D.F. Bull. Direction Études et Recherches, A, 3, 5–132.
- MANGIN, A. (1984): „Écoulement en milieu karstique.“ – Annales de Mines, Mai–Juin 1984, 1–8.
- MARJOLET, G. & J. SALADO (1975): „Contribution à l'étude de l'aquifère de la source du Lez (Hérault), III.“ – Mémoires du C.E.R.G.H., IX, fasc. III, 3.1–3.140.
- MÜLLER, I. & J. G. ZÖTL (1980): „Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz).“ – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 32, 5–100, Graz.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden einige Daten über das Abflußverhalten im Karstmilieu präsentiert. Es handelt sich um Meßwerte aus Pumpversuchen an den Bohrungen 14A von Vrysia (Thessalien) und $\Upsilon\Gamma_1$ - $\Upsilon\Gamma_2$ von Aghia (Kreta) und von Wasserstandsmessungen in der Umgebung der Quelle von Aghia. Die Auswertung der Pumpversuchsdaten zeigte eine Verringerung der hydraulischen Transmissivität T mit steigender Schüttung. Auch die Messungen des Karstwasserspiegels in der Umgebung der Quelle von Aghia erbrachten als Ergebnis ein System linearer Druckhöhenverluste. Diese Ergebnisse werden diskutiert und dem Versuch einer Interpretation unterzogen.

Summary

This paper presents some data on drainage in a Karst environment. These data have been yielded by pumping tests at the boreholes 14A in Vrysia (Thessaly) and $\Upsilon\Gamma_1$ - $\Upsilon\Gamma_2$ in Aghia (Crete) as well as from water level measurements in the surroundings of the Aghia Spring. The pumping test data show that the hydraulic transmissivity T is reduced in correspondence with increased flow of water. The measurements of the Karst water level in the surroundings of the Aghia Spring have indicated a system of linear pressure height reduction. These results are discussed, and an attempt at their interpretation is made.