

variation du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié de la plaine de Salonique (Grèce)

variation in the storage coefficient of a stratified aquifer
in the plain of Thessaloniki (Greece)

J. MELADIOTIS, C. DEMIRIS *

Rev. Franç. Géotech. n° 45, p.p. 51-58 (octobre 1988)

Résumé

L'exploitation de longue durée des eaux souterraines de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos, doit avoir modifié, entre autres, la valeur moyenne du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié de la région, telle qu'elle a été obtenue initialement à partir des essais de pompage il y a environ vingt ans.

Dans cette étude, la variation du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère ci-dessus a été calculée théoriquement à partir de la compaction des couches argileuses intercalaires, semi-perméables, dû à l'exploitation de longue durée.

Les résultats de ce travail montrent que l'exploitation de longue durée des eaux souterraines de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos, doit avoir apporté une augmentation importante (de l'ordre de dix peut-être) de la valeur du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié.

Abstract

The long-term withdrawal of groundwaters from the stratified aquifer of the valley of Thessaloniki between the rivers Axios and Gallikos, must have caused a substantial change in the value of the storage coefficient, as determined from the initial pumping tests.

This paper evaluates the change in the storage coefficient due to the compaction of the semi-permeable strata, associated with long-term production. It is concluded that an increase of the coefficient by one order of magnitude must have resulted during the production life of the aquifer.

* Laboratoire de Géologie du Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université Aristote de Thessaloniki, Grèce.

1. INTRODUCTION

L'exploitation de longue durée des nappes souterraines de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos (figure 1), région agricole de grande culture mais aussi région industrielle d'allure prospère, doit avoir modifié les valeurs des caractéristiques hydrau-

plastique) des couches argileuses intercalaires, semi-perméables, qui est liée au coefficient d'emmagasinement à long terme.

Le poids respectif de ces effets varie avec la profondeur des couches intéressées et la vitesse de variation du niveau piézométrique.



Fig. 1. — Carte schématique de la plaine de Salonique.
Localisation de la région d'étude.

Fig. 1. — Schematic plan of the Thessaloniki plain
indicating the area investigated.

liques de l'aquifère stratifié de la région, obtenues à partir des essais initiaux de pompage.

Le but essentiel de cette étude est l'estimation de la variation relative de la valeur du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié situé dans les dépôts quaternaires de cette région, provoquée par une exploitation de longue durée.

2. DÉFINITION THÉORIQUE DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT À LONG TERME

2.1. Définition

Dans le cas d'un aquifère stratifié constitué de couches alternées de sable et d'argile semi-perméable, à faible et moyenne profondeur, les essais de pompage correspondant à des écoulements de quelques jours ne donnent que le coefficient d'emmagasinement à court terme (coefficient d'emmagasinement de Theis), qui a un caractère local.

Dans le cas des exploitations de longue durée apparaît un phénomène de consolidation des couches, qui est beaucoup plus important pour les couches d'argile que pour les couches de sable. La consolidation des couches d'un aquifère stratifié a comme résultat, d'une part la diminution de la porosité des couches perméables et d'autre part la compaction (déformation

Pour des aquifères stratifiés de profondeur moyenne avec des couches argileuses intercalaires semi-perméables à faible et moyenne profondeur, l'effet déterminant est la compaction des couches d'argile.

2.2. Relation entre le coefficient d'emmagasinement à long terme et les couches intercalaires à faible et moyenne profondeurs

2.2.1. Compaction complète Compaction incomplète Influence du temps

Considérons le cas d'un aquifère stratifié, avec « N » couches argileuses intercalaires, semi-perméables, à faible et moyenne profondeur, et admettons que la compaction de toutes ces couches intercalaires soit complète. Dans ce cas, l'expression donnant le coefficient d'emmagasinement à long terme de l'aquifère ci-dessus peut s'écrire ainsi :

$$S = \gamma_w \cdot \sum_{i=1}^N (m_{vi} \cdot h_i) \quad (1)$$

où :

h_i est l'épaisseur de la couche intercalaire « i », en mètres,

m_{vi} son coefficient de compressibilité volumétrique, exprimé en m^2/N ,

et γ_w est le poids volumique de l'eau, exprimé en N/m^3 .

Dans l'équation (1), nous avons négligé les déformations élastiques de l'eau et du milieu poreux.

En réalité, la compaction n'est jamais complète, même si la pression de l'aquifère reste constante.

Une équation plus précise que celle donnée ci-dessus, peut être déduite de la théorie du tassement de TERZAGHI [14] :

$$S = \gamma_w \sum_{i=1}^N (m_{vi} \cdot h_i \cdot U_i) \tag{2}$$

où : U_i est le pourcentage de consolidation de la couche intercalaire « i ».

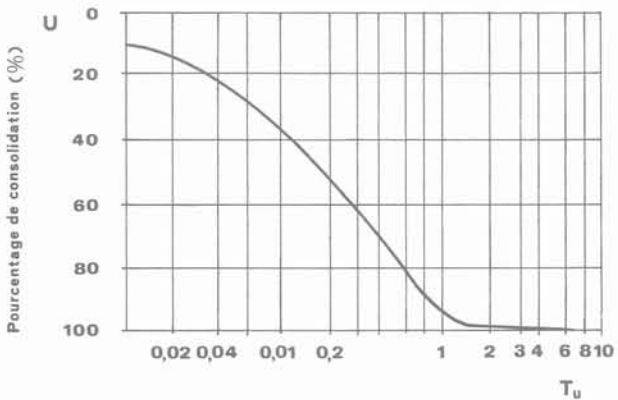


Fig. 2. — Relation entre U et T_u d'après Terzaghi et Frölich pour une couche intercalaire semi-perméable.

Fig. 2. — Relationship between U and T_u for a semi-permeable interlayer according to Terzaghi and Frölich.

Le pourcentage de consolidation est déterminé à partir du graphique de la figure 2, comme fonction du facteur T_u , donné par l'expression suivante :

$$T_u = \frac{4C_v}{H^2} \cdot t \tag{3}$$

où :

C_v est le coefficient de consolidation en m^2/s déterminé en laboratoire ;

t est le temps de consolidation en secondes ;

H représente le chemin de drainage en m, c'est-à-dire, la distance maximale que doit parcourir l'eau, pour atteindre une zone drainante en suivant toujours le plus court chemin.

Le coefficient d'emménagement, dû à la consolidation donné par l'équation (1), représente une valeur moyenne pour la période considérée.

2.2.2. Signification pratique

En comparant les équations (1) et (2), on note que l'on passe de l'une à l'autre en remplaçant h par $U \cdot h$ qui est appelé épaisseur efficace h_{ef} .

Physiquement, l'épaisseur efficace est la partie de la couche semi-perméable qui est en contact direct avec les couches perméables et qui est effectivement compactée pendant la période considérée.

Si la couche est épaisse, l'épaisseur efficace est, en fait, divisée en deux parties situées au toit et au mur de la couche intercalaire (figure 3).

Si la couche est mince, les deux parties sont réunies et toute la couche est compactée.

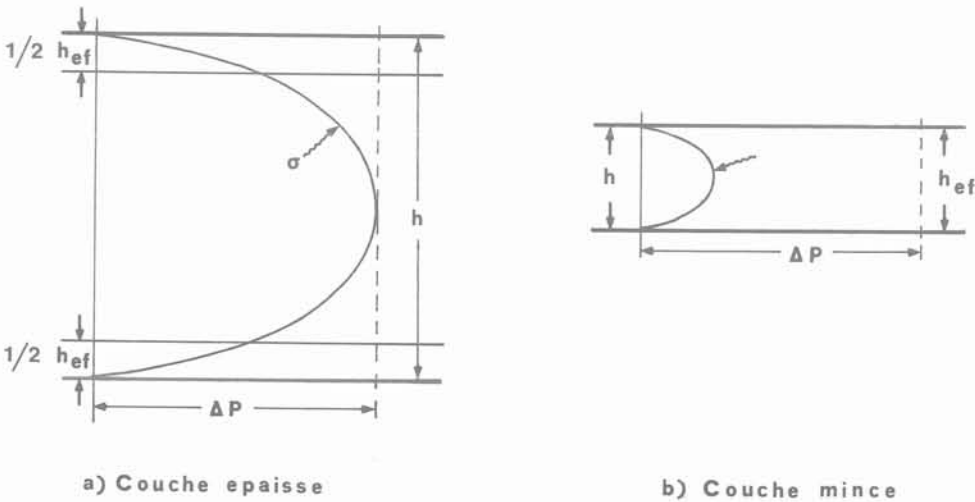


Fig. 3. — Schéma relatif à la notion d'épaisseur efficace H_{ef} .
Fig. 3. — Diagram illustrating the concept of the effective thickness h_{ef} .

Dans l'application pratique du calcul du coefficient d'emmagasinement, on admet que le coefficient de consolidation C_v est égal à $5.10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ représentant la valeur moyenne des mesures prises en laboratoire, citées dans l'ouvrage de TERZAGHI [14].

Pour déterminer le chemin de drainage H d'une couche argileuse semi-perméable et par conséquent son épaisseur pour laquelle le pourcentage de consolidation $U = 95 \%$, correspondant selon TERZAGHI à $T_u = 1$ (voir figure 2), on utilise l'équation (3) en considérant une période de temps $t = 20$ ans ou $6,3.10^8$ secondes, correspondant à l'échéance moyenne des prévisions des modèles :

$$T_u = \frac{4 \times 5.10^{-8}}{H^2} \times 6,3.10^8 = 1$$

d'où $H \approx 10 \text{ m}$.

On en conclut que toutes les couches d'épaisseur inférieure à 10 m seront entièrement compactées dans le temps considéré ($t = 20$ ans).

Pour les couches d'épaisseur supérieure à 10 m , le calcul de l'épaisseur efficace ($h_{ef} = U.h$) montre que,

pour les mêmes hypothèses, celle-ci est approximativement constante et égale à 10 m .

L'équation (1) devient alors :

$$S = \gamma_w \cdot \sum_{i=1}^N (m_{vi} \cdot h_{efi}) \quad (4)$$

où :

h_{efi} est l'épaisseur efficace de la couche intercalaire semi-perméable « i » en mètres ($h_{ef} = h$ pour $h \leq 10 \text{ m}$ et $h_{ef} = 10 \text{ m}$ pour $h > 10 \text{ m}$).

Il est évident que si la couche argileuse semi-perméable est très épaisse, son épaisseur efficace est divisée en deux parties, situées au toit et au mur de la couche : on prend alors pour le mur et également pour le toit $h_{ef} = 5 \text{ m}$.

Pour pouvoir utiliser l'équation (4), on doit connaître le coefficient de compressibilité volumétrique m_v , qui est fonction de la contrainte effective σ (figure 4) à laquelle le sol est soumis.

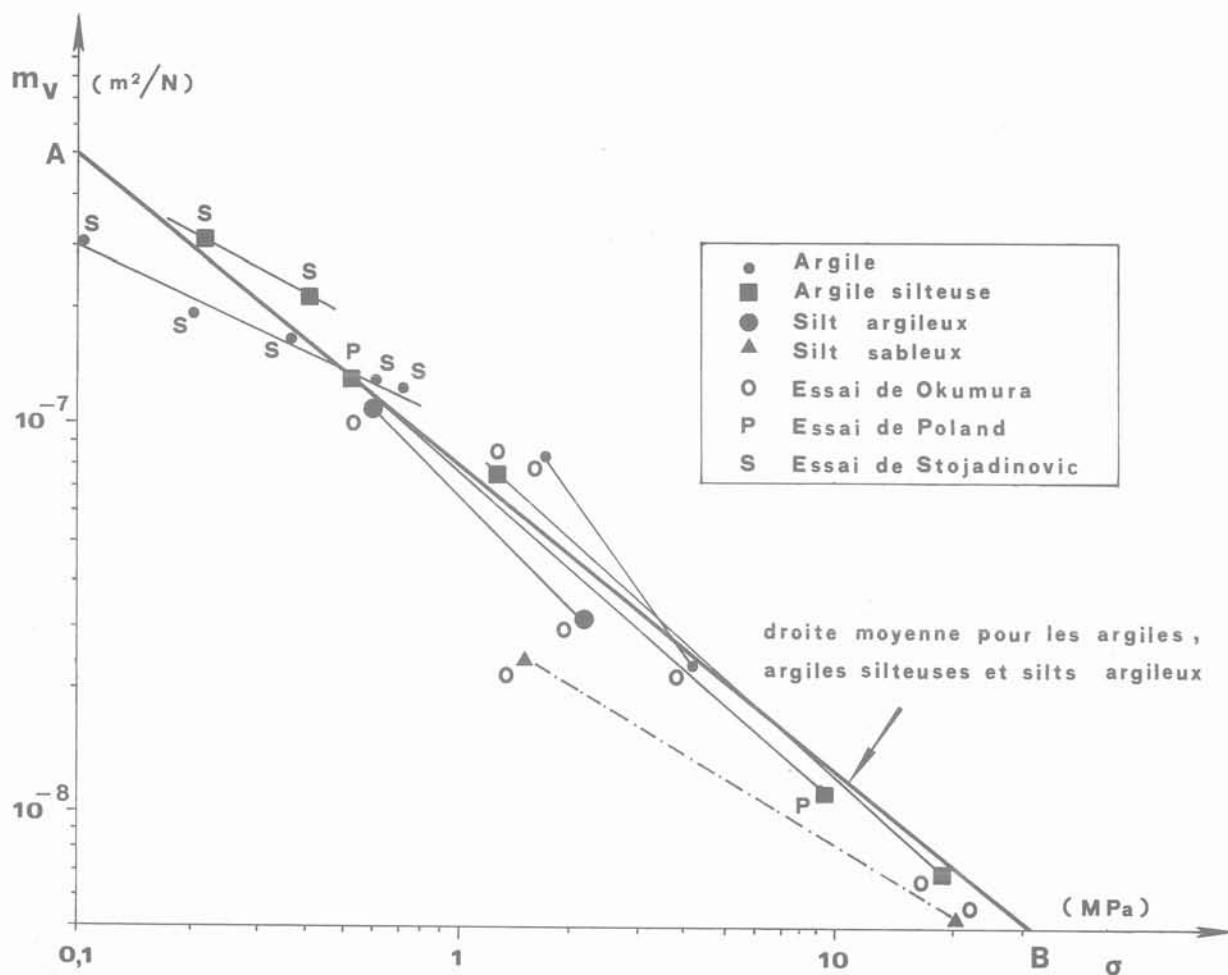


Fig. 4. — Relation entre le coefficient de compressibilité volumétrique m_v et la contrainte effective σ d'après les résultats de quelques essais de Okumura, Poland et Stojadinovic.

Fig. 4. — Relationship between the compressibility index and the effective stress as derived from experimental results by Okumura, Poland and Stojadinovic.

A partir du graphique de la figure 4, en échelle logarithmique, sur lequel sont résumés les résultats de quelques essais de OCUMURA, POLAND et STOJADINOVIC, relatifs à la détermination de m_v en fonction de σ , on constate que la dispersion de la plupart des résultats est assez faible, compte tenu du caractère du phénomène. Tous les résultats relatifs à l'argile, l'argile silteuse et le silt argileux ont ainsi pu être représentés par une seule droite. La droite AB du graphique de la figure 4 correspond à la droite moyenne pour les argiles, argiles silteuses et silts argileux.

Puisque le coefficient de compressibilité volumétrique d'une couche est fonction de sa profondeur par rapport au sol, pour trouver la relation existant entre le coefficient de compressibilité volumétrique m_v et la profondeur M , on utilise les résultats de MURAYAMA, qui a montré que la pression de préconsolidation est sensiblement supérieure à la pression due au poids des terrains sus-jacents pour toutes les couches plus profondes que 20 m, le rapport étant de l'ordre de 1,5.

Si l'on admet que le poids spécifique du milieu poreux saturé est de l'ordre de 2.10^4 N/m^3 et que l'effet de l'artésianisme sur la contrainte effective est négligeable, on arrive à la relation approchée entre la contrainte effective σ et la profondeur M :

$$\sigma = 0,3 \cdot M \quad (5)$$

D'après cette relation, on peut calculer la valeur du coefficient de compressibilité volumétrique d'une for-

mation argileuse en fonction de sa profondeur par rapport au sol.

3. APPLICATION AU CAS DE L'AQUIFÈRE STRATIFIÉ DE LA PLAINE DE SALONIQUE ENTRE LES RIVIÈRES AXIOS ET GALLIKOS RÉSULTATS OBTENUS

Les nappes souterraines situées dans les sédiments quaternaires de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos, sont pompées par plusieurs forages. Les forages d'exploitation, les plus importants dont la profondeur varie de 120 à 220 m, sont notés sur la carte de la figure 5.

Les forages d'exploitation de la région ci-dessus ont été construits à partir de la fin de la décennie de 1960 jusqu'au début de la décennie de 1970 ; ils traversent un grand nombre d'aquifères successifs d'environ 1 à 4 m d'épaisseur. Ces aquifères sont constitués par des couches de sables, de graviers et de galets, séparés entre eux par des couches argileuses imperméables ou semi-perméables d'épaisseur 3 à 30 m environ. A l'exception de la couche argileuse qui correspond aux dépôts du pro-delta du Delta de la rivière Axios et qui se caractérise comme étant une formation imperméable, toutes les autres couches argileuses intercalaires se

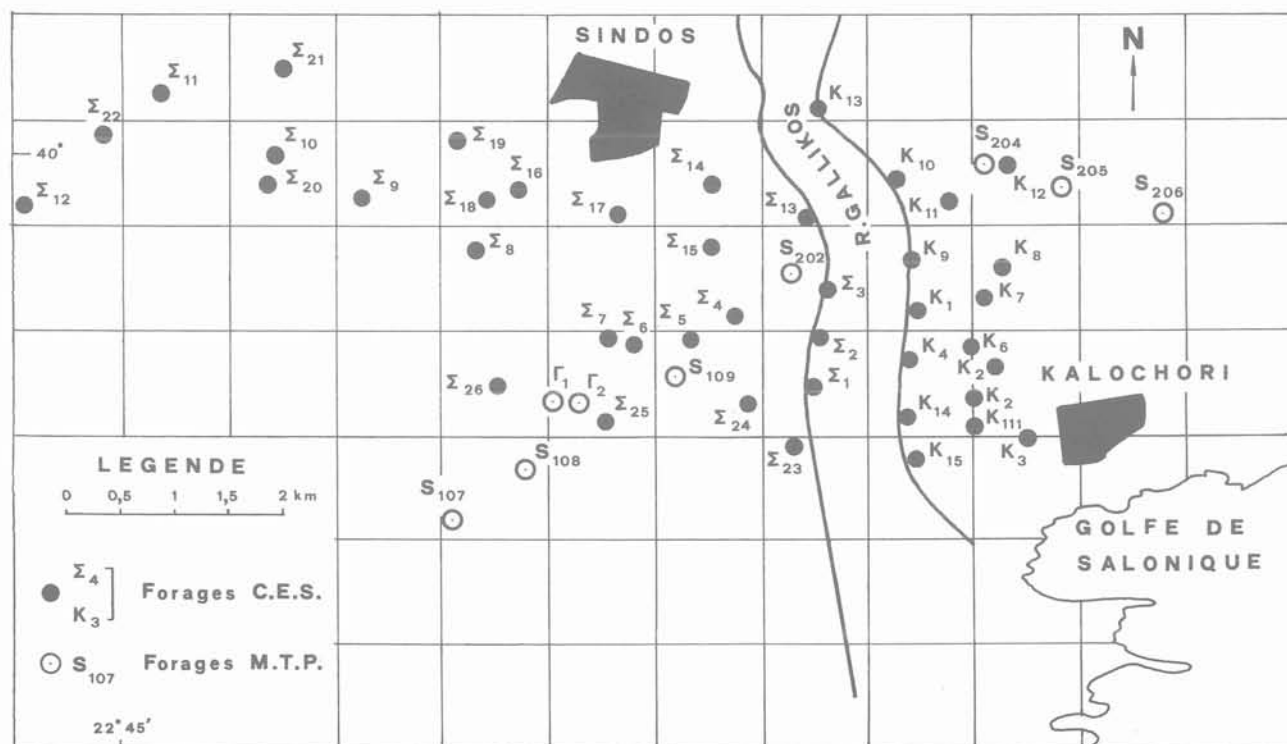


Fig. 5. — Emplacements des forages dans la région étudiée.

Fig. 5. — Locations of boreholes in the area of investigation.

caractérisent comme des formations semi-perméables d'après les résultats des analyses granulométriques. La caractérisation de ces couches argileuses comme formations semi-perméables, a été basée en plus sur les résultats des essais initiaux de pompage dans les forages (courbe caractéristique entre le rabattement observé et le temps de pompage). Pour les exigences de ce travail, la détermination exacte des niveaux des formations argileuses intercalaires rencontrés dans les forages a été réalisée à partir du carottage par rayons gamma (diagraphies de radioactivité naturelle).

D'après les résultats obtenus, d'une part par des essais de pompage et d'autre part par des analyses granulométriques, pétrographiques et morphoscopiques des formations détritiques traversées par les forages, les aquifères précités ont des caractéristiques individuelles, mais comme ils sont exploités tous ensemble, on peut ignorer ces caractéristiques et envisager leur comportement global. On peut, donc, considérer ce système

partir des essais initiaux de pompage dans les forages Γ_{21} , Σ_{17} et Σ_{14} et d'autre part à partir de la compaction des couches argileuses intercalaires semi-perméables qui apparaissent dans les forages précités. Dans le premier cas, les valeurs du coefficient d'emmagasinement à court terme (coefficient d'emmagasinement de Theis) de l'aquifère stratifié sont respectivement $2,7 \cdot 10^{-3}$, $4,4 \cdot 10^{-3}$ et $3,8 \cdot 10^{-3}$, tandis que, dans le deuxième cas, les valeurs du coefficient d'emmagasinement à long terme, qui correspondent aux formations argileuses intercalaires, semi-perméables, sont données explicitement dans les tableaux I, II et III.

D'après ces résultats, on constate que la valeur du coefficient d'emmagasinement à long terme de l'aquifère stratifié est de l'ordre de 10^{-2} . Il est évident que cette valeur du coefficient d'emmagasinement à long terme est théorique et dépend de divers facteurs, tels que la structure et la géométrie des couches perméables et semi-perméables de l'aquifère stratifié. Pourtant, la

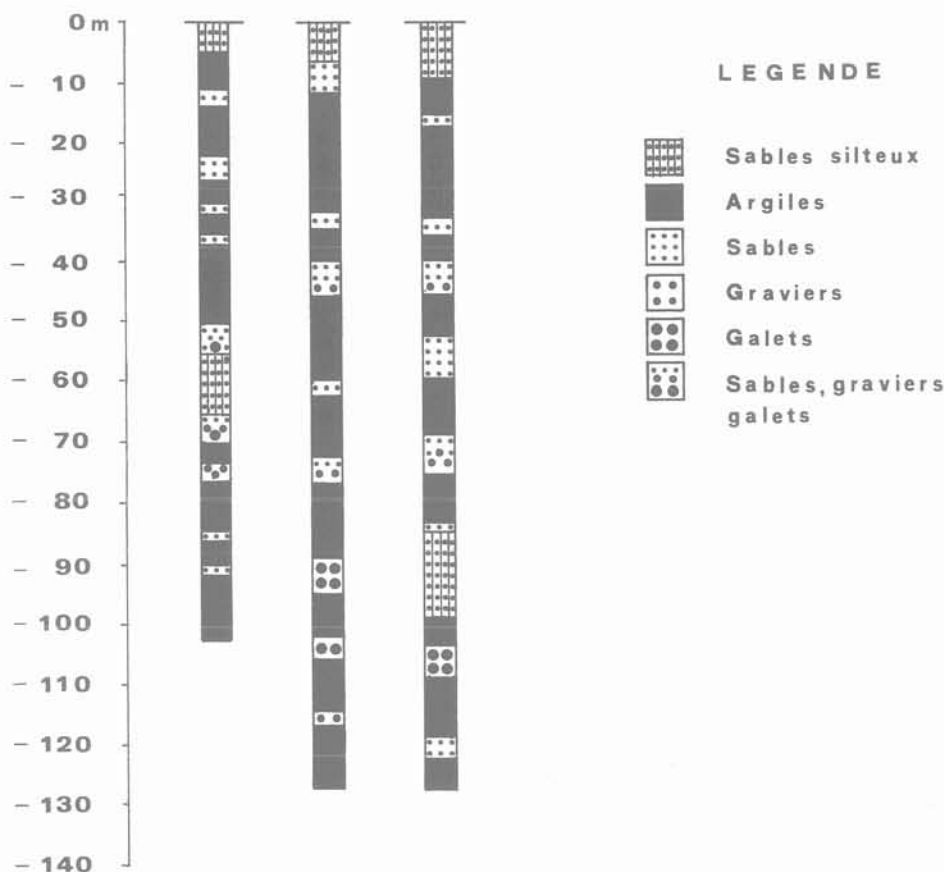


Fig. 6. — Coupes lithologiques des forages d'exploitation de la région étudiée.

Fig. 6. — Lithological logs of producing boreholes in the area of investigation.

comme un aquifère stratifié où les couches argileuses semi-perméables à faible et moyenne profondeurs jouent le rôle d'intercalations.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos ont été déterminées, d'une part à

grandeur de la valeur du coefficient d'emmagasinement à long terme montre que, indépendamment de la diminution de la porosité des couches perméables, le tassement des couches argileuses intercalaires, semi-perméables, dû à l'exploitation de longue durée peut augmenter considérablement la valeur du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié qui s'étend

Tableau I. Evaluation du coefficient d'emmagasinement à long terme pour le forage Γ_2

Intervalle d'apparition des niveaux argileux semi-perméables en m	Profondeur moyenne en m	Epaisseur en m		Coefficient de compressibilité m_v en m^2/N	Coefficient d'emmagasinement à long terme S
		réel h	efficace h_{ef}		
26 - 30,5	28,25	4,5	4,5	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$4,05 \cdot 10^{-3}$
31 - 35	33,00	4,0	4,0	$8,2 \cdot 10^{-8}$	$3,28 \cdot 10^{-3}$
70 - 73	71,50	3,0	3,0	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$
76 - 84	80,00	8,0	8,0	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$3,20 \cdot 10^{-3}$
85 - 90	87,50	5,0	5,0	$3,8 \cdot 10^{-8}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$
91 - 102	96,50	11,0	10,0	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$3,50 \cdot 10^{-3}$
					$S = 1,73 \cdot 10^{-2}$

Tableau II. Evaluation du coefficient d'emmagasinement à long terme pour le forage Σ_{17}

Intervalle d'apparition des niveaux argileux semi-perméables en m	Profondeur moyenne en m	Epaisseur en m		Coefficient de compressibilité m_v en m^2/N	Coefficient d'emmagasinement à long terme S
		réel h	efficace h_{ef}		
21 - 31	26,00	10,0	10,0	$9,4 \cdot 10^{-8}$	$9,40 \cdot 10^{-3}$
45 - 59	52,00	14,0	10,0	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$5,60 \cdot 10^{-3}$
61 - 72,5	66,75	10,5	10,0	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$4,80 \cdot 10^{-3}$
76 - 88	82,00	12,0	10,0	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$
94 - 101	97,50	7,0	7,0	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$
105 - 114	109,50	9,0	9,0	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$2,97 \cdot 10^{-3}$
116 - 127	121,50	11,0	10,0	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$
					$S = 3,22 \cdot 10^{-2}$

Tableau III. Evaluation du coefficient d'emmagasinement à long terme pour le forage Σ_{14}

Intervalle d'apparition des niveaux argileux semi-perméables en m	Profondeur moyenne en m	Epaisseur en m		Coefficient de compressibilité m_v en m^2/N	Coefficient d'emmagasinement à long terme S
		réel h	efficace h_{ef}		
22 - 32	27,00	10,0	10,0	$9,3 \cdot 10^{-8}$	$9,30 \cdot 10^{-3}$
45 - 52	48,50	7,0	7,0	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$4,20 \cdot 10^{-3}$
59 - 68	63,50	9,0	9,0	$4,9 \cdot 10^{-8}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$
75 - 84	79,50	9,0	9,0	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$3,60 \cdot 10^{-3}$
98 - 103	100,50	5,0	5,0	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$
108 - 118	113,00	10,0	10,0	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$
122 - 127	124,50	5,0	5,0	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$
					$S = 2,78 \cdot 10^{-2}$

dans les dépôts quaternaires de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos. Cet aspect théorique est renforcé par les résultats de quelques essais de pompage qui ont été réalisés dans les forages de deux aquifères stratifiés avec des couches argileuses intercalaires semi-perméables, au Sahara septentrional (BORELI, 1971, 1978) et en Libye (MAILLARD-ROSET, 1976), en vue de déterminer les nouvelles valeurs du

coefficient d'emmagasinement après une exploitation de longue durée. Les résultats de ces essais ont montré une augmentation importante du coefficient d'emmagasinement des aquifères ci-dessus, de l'ordre de 100. Plus précisément, la valeur du coefficient d'emmagasinement des aquifères ci-dessus a augmenté de 10^{-5} à 10^{-3} .

4. CONCLUSION

A partir des valeurs du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié à faible et moyenne profondeur de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos, obtenues par les essais initiaux de pompage et par la consolidation des couches argileuses intercalaires semi-perméables, on conclut que l'exploitation de longue durée doit avoir apporté une augmentation importante (peut-être un décuplement) de la valeur du coefficient d'emmagasinement.

BIBLIOGRAPHIE

1. BOGOMOLOV G. et SILIN-BEKTCHOURINE A. (1955), *Hydrogéologie Spécialisée*, Ed. B.R.G.M. (37), Paris.
2. BOGOMOLOV G. (1962), *Hydrogéologie et notions de géologie d'ingénieur*, Ed. Paix, Moscou.
3. BORELI M. (1978), *Hétérogénéité des milieux poreux et effet d'échelle*, Symp. Intern. de l'Assos. Inter. de Rech. Hydrauliques. Thessaloniki, Grèce. Ed. Univers. Aristote de Thessaloniki., Thessaloniki.
4. CASTANY G. (1967), *Traité pratique des eaux souterraines*, Ed. Dunod, Paris.
5. DEMIRIS C. (1984), *Géologie du génie civil*, Ed. U.A.T., Thessaloniki.
6. LAMBE T. and WHITMAN R. (1969), *Soil mechanics*, Ed. John Wiley, New York.
7. LEE I. (1968), *Soil mechanics*, Ed. Butterworths, London.
8. MAILLAND-ROSSET G. (1976), *Etude d'un aquifère profond hétérogène en zone aride, plaine du Wadi Al Hira et du Wadi Abu Shaybah Tripolitaine (Libye)*, Thèse 3^e cycle, U.S.M.G.
9. MELADIOTIS J. (1984), *Etude géologique de la partie Est de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos où se développent des aquifères exploitables*, Thèse U.A.T., Thessaloniki.
10. MURAYAMA S. and SHIBATA T. (1966), *Flow and stress relaxation of clays*, Int. Symp. on Rheology and Soil Mech. Grenoble, France. Ed. Springer Verlag, New York, pp. 99-129.
11. POLAND J., LOFGREN B. and RILLEY F. (1972), *Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal*, U.S. Geological Survey Water-Supply, paper 2025.
12. SCHNEEBELI G. (1978), *Hydraulique souterraine*, Ed. Eyrolles, Paris.
13. SCHLOSSER F. (1973), *Hypothèses et théories pour la prévision des tassements des remblais sur sols compressibles*, Bul. de Liaison L.P.C. Special T, Paris, pp. 26-57.
14. TERZAGHI K. et PECK R. (1957), *Mécanique des sols appliquée*, Ed. Dunod, Paris.
15. TODD D. (1959), *Groundwater hydrology*, Ed. John Wiley, New York.
16. U.N.E.S.C.O. (1972), *Etude des ressources en eau du Sahara septentrional*, Plaque n° 1, Paris.