

Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	σελ.	Αθήνα
Bull. Geol. Soc. Greece	XXII	25 - 40	1990
	Vol.	pag.	Athens

CONTRIBUTION A L' ETUDE DE L' INJECTION D' EAU
DANS LES PUIITS DE GRANDE DIAMETRE. L' APPROCHE AUX
PARAMETRES HYDRAULIQUES

G.C. STOURNARAS*

R E S U M E

Les conditions hydrodynamiques qui apparaissent pendant et après une injection d'eau dans un puits à grande diamètre sont considérées dans le cadre d'un essai d'injection typique, d'une alimentation artificielle de la nappe aquifère et d'un pompage d'essai "négatif" ou "fictif".

Une telle injection a permis l'analyse du régime hydrodynamique ainsi que de remarques concernant l'injection elle-même aussi que les particularités déduites des conditions hydrogéologiques, hydrodynamiques et techniques du puits considéré.

Les mesures obtenues ont été traitées, dans la voie d'injection et dans la voie de pompage d'essai pour l'approche aux paramètres hydrauliques, au moins à l'environ du puits. L'application critique des méthodes a permis les conclusions générales sur les puits à grande diamètre et sur l'estimation des paramètres hydrauliques.

A B S T R A C T

The hydrodynamic conditions, during and after a water injection in a large diameter well, are faced as a typical injection, as an artificial alimentation of the water table and as a "positive" or "negative" pumping test. Such an injection allowed the analysis of the hydrodynamic regime and some remarks concerning not only the injection itself but also some particularities of the hydrogeological, hydrodynamic and technical conditions of the mentioned well. The measurements were elaborated in the frame of an injection and of a pumping test for an approach to the hydraulic parameters, at least in the well environment. The critical application of the methods allowed the general conclusions concerning the large diameter wells and the estimation of the hydraulic parameters.

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF WATER INJECTION IN LARGE DIAMETER WELLS.
APPROACH TO THE HYDRAULIC PARAMETERS.

* Université d'Athènes. Département de Géologie. PANEPISTIMIIOUPOΛIS ZOGRAFOU, Athènes 15771.

Ανακοινώθηκε στη Συνεδρία της Αθήνας στις 21/1/87

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Γεώφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

1ERE PARTIE

1. GENERALITES. LES DONNES D'ESSAI

1.1. INTRODUCTION

Le processus de l'absorption d'eau par le sol, au cours d'une injection, peut être envisagé lors.

- d'essai d'injection, typique (à charge constante ou variable).
- de l'alimentation artificielle de la nappe aquifère, sur une échelle limitée.
- de pompage d'essai "négatif", où de pompage d'essai "fictif".

L'utilisation d'un de ces cadres permet l'approche des paramètres hydrauliques d'une nappe aquifère et, encore, de l'hydraulique des puits, dans les conditions spéciales, par exemple en cas d'impossibilité de réalisation des essais de pompage conventionnels. Nous avons envisagé cette impossibilité dans le cadre d'une étude hydrogéologique de la région de Komotini (Grèce du Nord). Dans une partie de cette région les points d'eau souterraine étaient représentés par des puits de grand diamètre, profondes et abandonnés, dans lesquels les pompes disponibles, au cours de cette étude, ne pourraient pas provoquer le rabattement nécessaire.

1.2. LE CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La région étudiée se trouve au Nord de la ville de Komotini, dans une zone intermédiaire, entre la plaine alluviale et la zone du massif métamorphique du Rhodope. Elle se compose d'anciens sédiments de la rivière Pospos et d'éboulis. Cet ensemble présente une perméabilité élevée qui permet la formation d'une nappe aquifère libre, alimentée, à la fois, par la précipitation et par des infiltrations latérales d'eau déduite des torrents de la région. Les matériaux détritiques se caractérisent d'une hétérogénéité latérale et verticale, surtout en ce qui concerne la séquence des matériaux grossiers.

1.3. LES DONNEES DU PUIITS ET DE L'INJECTION

Le puits choisi pour l'injection a une profondeur de 15.80m, un diamètre de 2m et un niveau piézométrique à la profondeur de 10.35m. Le puits possédait un revêtement de béton, or les pertes et l'alimentation étaient limitées au fond du puits, c'est, donc, essentiellement, la perméabilité verticale qui intervient, au moins en ce qui concerne l'environnement du puits.

L'injection concernait un volume d'eau de 7.86m³ en 25 min. Les mesures de la profondeur de la surface de l'eau, dans le puits concernaient la période d'élévation (pendant l'injection) et d'abaissement (après la fin de l'injection).

	t	p	t	p	t	p	t	p	t	p	t	p	t	p
t: min														
p: profondeur(m)	0	10.35	12	9.49	14	9.34	16	9.17	18	8.98	20	8.83	25	8.67

Tableau 1. Mesures d'élévation du niveau d'eau

Table 1. Measurements of water elevation. t: min, p: depth

t (min)	s (m)	t (min)	s (m)	t (min)	s (m)	t (min)	s (m)
0	0.000	13	0.060	36	0.210	165	0.650
2	0.010	15	0.080	40	0.230	195	0.720
3	0.010	20	0.120	45	0.250	235	0.810
4	0.020	21	0.130	50	0.270	250	0.850
5	0.020	22	0.140	60	0.310	265	0.890
7	0.030	23	0.145	75	0.370	280	0.920
9	0.055	25	0.155	90	0.430		
11	0.055	30	0.180	105	0.480		

Tableau 2. Mesures de l'abaissement du niveau d'eau.

Table 2. Measurements of the water depletion.

1.4. LE REGIME HYDRODYNAMIQUE DE L'INJECTION

Les écoulements souterrains et leurs variations pendant une injection (ainsi que pendant un pompage) représentent un sujet d'étude énorme, dans le cadre de milieu poreux. Les conditions générales et les problèmes spéciaux peuvent être les suivants.

L'eau injectée du façon transitoire est séparée de l'eau de la nappe, composant le cône d'injection (fig.1).

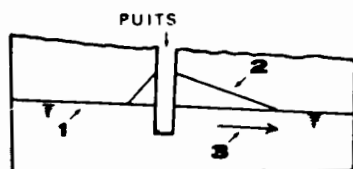


Fig. 1. Modèle schématique de l'injection. (1) Niveau hydrostatique. (2) Cône d'élévation. (3) Direction d'écoulement souterrain.

Fig. 1. Schematic model of the injection. (1) Hydrostatical level. (2) Cone of injection. (3) Direction of ground water flow.

Ce cône excentrique, avec son grand diamètre dans la direction d'écoulement souterrain, se forme par l'absorption d'eau par le fond et les parois du puits. Dans le cas des parois étanches la forme du cône devient la même d'une façon secondaire.

L'écoulement de l'eau injectée, à la sortie du puits est radial, mais très vite cette forme change sous l'influence de l'écoulement souterrain. L'eau injectée suite une propagation rapide vers la direction générale d'écoulement. Ce schéma peut être modifié en cas de conditions limites ou en cas d'une hétérogénéité forte, surtout dans le sens horizontal. Les lois d'écoulement radial, exprimant les conditions de pompage ne sont plus valables, sans l'intervention des conditions limites, concernant l'interaction entre le cône et l'écoulement.

La masse de l'eau injectée se caractérise de la forme du cône et son mouvement. Si la vitesse d'écoulement souterrain est faible, l'eau injectée "s'allonge" sur la nappe. Si cette vitesse est élevée, l'eau injectée "glisse" sur la nappe. Dans ce cas, c'est la vitesse d'écoulement qui influe sur la forme du cône, tandis que dans le premier cas c'est le débit de l'injection, qui est le facteur principal de la forme du cône.

En ce qui concerne l'injection essayée, malgré la perméabilité élevée de l'aquifère, la vitesse totale d'écoulement paraît être faible, en raison de l'hétérogénéité de l'ensemble, donc c'est la charge hydraulique appliquée influant sur la forme du cône d'injection.

En général, on constate que, pendant l'injection, se forme un écoulement transitoire, déterminé pour les pompages. L'équivalence des paramètres figure au tableau suivant.

POMPAGE	INJECTION
Débit Q positif (constant)	Débit Q négatif (constant)
Rabattement s	Élévation $h = -s$
Coefficient d'emménagement S	Coefficient de remplissage R

Tableau 3. Identification d'écoulement transitoire de pompage et d'injection.
Table 3. Identification of pumping and injection non steady flow.

Il faut y signaler que le facteur R/S (Réversibilité de la nappe aquifère) est usable dans le cas des aquifères captives ou S et R proviennent de l'élasticité de la couche aquifère. Dans le cas des nappes libres, ou assimilées aux libres, il est bien connu que la valeur de S ne devient constante qu'après un certain temps de pompage. Cette valeur limite est jonction du rabattement et est équivalente à la porosité utile dès que le rabattement est remarquable. Or, dans le cas de nappes libres, l'équivalence entre S et R doit être envisagée

avec prudence.

L'injection d'un débit constant peut être considérée comme le cas général de l'alimentation naturelle de la nappe. Dans ce domaine on a examiné deux choses. L'une, concerne le fait que l'injection débute à débit constant, mais que l'élévation dans le puits (régime transitoire) est limitée si le niveau de l'eau arrive à la surface. L'autre, concerne la mobilisation de l'ensemble de la charge hydraulique disponible pour que le débit maximal puisse s'injecter. Dans le dernier cas, les équations connues ne sont plus valables et la solution de JACOB-LOHMAN (essais de rabattement ou d'élévation constantes) permet l'approche à la variation de débit.

1.5. QUELQUES REMARQUES PENDANT L'INJECTION

Le niveau élevé dans le puits peut être considéré comme un niveau de la nappe dans une autre période de l'année hydrologique-période des hautes eaux. Puisque les mesures d'élévation n'étaient pas évidentes pendant l'injection on ne peut pas les utiliser dans la voie d'un pompage négatif. Par contre, à partir des mesures d'abaissement du niveau (après l'injection) on peut arriver à un rabattement assimilé au rabattement normal de pompage.

La courbe "rabattement-logt" (après l'injection) présente quatre parties bien distinctes entre elles et dans un ordre d'augmentation de leur pente (parties I, II, III, IV). Si l'élévation du niveau peut être considéré comme un "pompage négatif" et l'abaissement de ce niveau comme un "pompage fictif", les parties de cette courbe ne sont pas dues à "l'arocement du cône dans des milieux de perméabilité différente", mais tout simplement font partie du modèle de propagation du cône d'injection et de la capacité de la nappe d'absorber l'eau injectée. De toute façon cette absorption paraît être différente au cours des étapes exprimées par les parties de la courbe expérimentale. Pour l'analyse des conditions de l'injection et de ses variations on a construit le tableau suivant où figurent: le volume d'eau absorbée (V), le débit d'absorption (Q), le débit spécifique d'absorption ($q=Q/s$), le rabattement (s) et le rabattement unitaire (s/t).

ETAPE	t (sec)	Q (m ³ /sec)	s (m)	q (m ² /sec)	s/t (m/sec)
I	780	0.00024	0.08	0.00300	0.00019
II	2.820	0.00022	0.23	0.00096	0.00008
III	8.100	0.00022	0.49	0.00045	0.00006
IV	5.100	0.00022	0.43	0.00051	0.00008

Tableau 4. Variations des paramètres d'injection.
Table 4. Variation of injection parameters.

A partir des données du tableau, il est bien clair que le débit d'absorption reste constant pendant tout le temps de l'injection, même en ce qui concerne la dernière étape, où l'absorption n'était pas encore finie. Or, la variation du débit d'injection n'est pas conjointe au rabattement. De la même façon, le paramètre s/t peut être considéré comme constant, les différences des valeurs étant les résultats des erreurs des mesures, qui existent toujours. Le paramètre qui vraiment présente des variations est s , en raison de l'hétérogénéité de l'aquifère, qui influe sur la propagation du cône d'injection. Il est évident que les valeurs de q présentent des variations analogues.

2ème P A R T I E

2. APPLICATION DES METHODES

2.1. TRAITEMENT DES DONNEES DANS LA VOIE D'INJECTION

2.1.1. "Méthode slug" - injection non instantanée

Cette méthode concerne des puits complets, entièrement crépinés et des nappes aquifères captives, avec des valeurs de Transmissivité faibles. Ceci est déduit des travaux de COOPER, BREDEHOFFT et PAPAPOULOS (1967), qui ont proposé, pour le domaine des conditions de Theis, la solution d'un écoulement radial, autour d'un puits, pour un régime transitoire.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \text{ et } H = 8H_0 \frac{\alpha}{\pi^2} \left(\int_0^{\infty} \exp - \frac{\beta u^2}{\alpha} \right) \frac{du}{u \Delta u}$$

où, H est la charge hydraulique dans le puits à l'instant t après l'injection (ou recouvrement), H_0 la charge au moment de l'injection, $\alpha = \frac{r_s^2 S}{r_c^2}$ (sans dimensions), r_s le rayon du puits dans la section absorbante, r_c le rayon de la colonne de variation de la charge, $\beta = \frac{Tt}{r_c^2}$ (sans dimensions) et $\Delta u = \{uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)\} + \{uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u)\}^2$, où J_0 , J_1 est jonction de Bessel de première espèce et du premier ordre, Y_0 , Y_1 les mêmes jonctions de deuxième espèce et u la variable de la jonction.

Le type de la nappe étudiée ne permet pas normalement l'application de cette méthode. Les conditions d'une nappe captive et d'une valeur faible de la Transmissivité sont nécessaires de point de vue de la possibilité de poursuivre les variations du niveau d'eau. Pourtant, ceci fut possible pendant l'injection instantanée. Cette difficulté peut être surmontée en considérant que les mesures obtenues après la fin de l'injection, l'ont été alors que le débit d'absorption était déjà constant. Enfin, le processus d'absorption demande une modification rapide d'écoulement radial à cause de l'évolution du cône d'injection. Nous pouvons admettre qu'au moment de chaque mesure, la base de la colonne est représentée par un écoulement radial, ceci étant proche à la réalité, puisque l'absorption était faite exclusivement par le fond de puits. L'utilisation des

courbes types de LOHMAN (1972) permet la comparaison avec les courbes expérimentales $H/H_0 - \log t$ (fig.2)

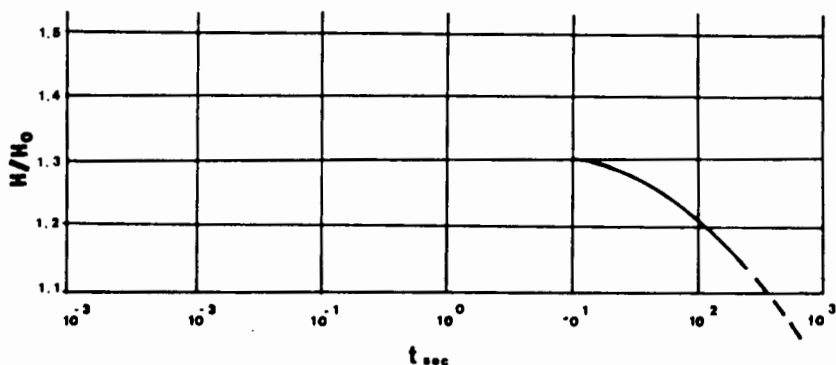


Fig. 2. Courbe expérimentale $h/h_0 - \log t$
 Fig. 2. Experimental curve $h/h_0 - \log t$

Les résultats obtenus sont les suivants.

Coincidence relative avec la courbe	$a=10^{-3}$	$\beta=1$	$t=780\text{sec}$
			$T=1.3 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{sec}$
" " " "	$a=10^{-2}$	$\beta=1$	$t=1650\text{sec}$
			$T=1.9 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{sec}$
" " " "	$a=10^{-5}$	$\beta=1$	$t=385\text{sec}$
			$T=8.0 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{sec}$

La troisième valeur de T n'est pas finalement pas correcte, puisque la coïncidence avec cette courbe fut la moins bonne.

L'identification de r_c et r_s fait que la valeur de a est égale à celle de S . Même ceci n'est pas vraiment exact, en raison de la différence limitée entre les courbes types et parce que la courbe expérimentale se trouve dans la zone de courbes $a=10^{-3}$ et $a=10^{-2}$, nous considérons les valeurs de S comme réelles. Or, si $t=1 \cdot r_c^2/t$ ($\beta=Tt/r_c^2=1$), on arrive aux valeurs suivantes $T=5.1 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{sec}$. $T=2.4 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{sec}$.

2.1.2. Essai à charge variable (MAAG)

Dans ce cas le puits est considéré comme un forage de grand diamètre, avec le tubage jusqu'au fond. D'après cette méthode.

$$K = \frac{A}{C(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

A étant la section de la colonne d'eau dans le puits ($A=1/4 \pi d^2$), d le diamètre à l'intérieur du puits, h_1 , h_2 les charges hydrauliques aux instantes t_1 , t_2 et C le coefficient de poche. Comme coefficients C ont été utilisés avec les valeurs $2.75 d$, $2.85 d$, $2\pi d$, $2d$, $A/C=d/8$. Les conditions du puits correspondent aux deux premières valeurs, mais les autres ont été aussi utilisées pour que les résultats puissent être comparés et parce-qu'elles puissent représenter partiellement ou complètement les conditions du puits, liées à l'hétérogénéité du milieu. Le traitement des données figure au tableau 5.

L'épaisseur H utilisée (10m) est plutôt estimée d'une façon conservative, ailleurs les valeurs de T pourraient arriver à l'ordre de grandeur de 10^{-3} . Le fig.3 montre les diverses valeurs de C qui conduisent aux différentes valeurs de T pour les étapes successives. Les modifications des valeurs de T sont comparables entre elles.

L'examen des valeurs absolues montre que tous les coefficients C conduisent aux valeurs de T de même ordre de grandeur (10^{-4}). L'utilisation des coefficients les plus probables ($2.75 d$, $2.85 d$) donne des valeurs presque identiques ($2.9 - 2.8 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$). L'utilisation d'autres coefficients augmente ou diminue les valeurs moyennes de T , puisque le grand diamètre du puits devient déterminant. Donc, le coefficient réduit $2d$ donne une valeur moyenne de $3.9 \cdot 10^{-4}$ et les coefficients élevés $2\pi d$ et $A/C=d/8$ donnent la même valeur moyenne ($1.3 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{sec}$), puisque le diamètre du puits se trouve au dénominateur de la relation (épaisseur de la couche aquifère constante de 10m).

2.1.3. GILD et GAVARD, 1957

Pour le cas d'un puits tubé jusqu'au fond, le premier essai amène au résultats les plus acceptables, s'il s'agit des formations de grande perméabilité. D'après GILD et GAVARD $K = \frac{\Phi}{8\Delta t} \frac{\Delta h}{h_m}$, Φ étant le diamètre effectif du puits, Δt le temps d'essai pour chaque étape, Δh l'abaissement du niveau d'eau et h_m la distance verticale entre la base du cône et le milieu de Δh . Cette relation montre que la valeur de la perméabilité est indépendante du rayon du cône et, donc, partiellement indépendante du diamètre du puits. Le facteur $\Delta h/\Delta t \cdot h_m$ étant la variable de la corrélation, pour un débit d'absorption constant ($\Delta h/\Delta t$ avec $\Phi=C_{te}$), amène à une constance des valeurs de perméabilité, en demandant à la fois une valeur de K plus élevée que celle de $10^{-2} \text{cm}/\text{sec}$. Les valeurs de K estimées d'après ce processus sont constantes pour les trois premières étapes ($K=2.38 \cdot 10^{-4}$, $2.71 \cdot 10^{-4}$, $8.00 \cdot 10^{-5} \text{cm}/\text{sec}$).

ETAPE	t_2-t_1	C	h_1/h_2	$\ln(h_1/h_2)$	$K = \frac{A}{C(t_2-t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2}$	$T = K \cdot H$ (pour $H=10m$)
I	780"	2.75d	1.68/1.62	0.04	$2.9 \cdot 10^{-5} m/s$	$2.9 \cdot 10^{-4} m^2/s$
I	780"	2.85d	1.68/1.62	0.04	$2.8 \cdot 10^{-5} m/s$	2.8 " "
I	780"	2πd	1.68/1.62	0.04	$1.3 \cdot 10^{-5} m/s$	1.3 " "
I	780"	2d	1.68/1.62	0.04	$4.0 \cdot 10^{-5} m/s$	4.0 " "
I	780"	A/C=d/8	1.68/1.62	0.04	$1.3 \cdot 10^{-5} m/s$	1.3 " "
II	2820"	2.75d	1.62/1.37	0.17	$3.4 \cdot 10^{-5} m/s$	3.4 " "
II	2820"	2.85d	1.62/1.37	0.17	$3.3 \cdot 10^{-5} m/s$	3.3 " "
II	2820"	2πd	1.62/1.37	0.17	$1.5 \cdot 10^{-5} m/s$	1.5 " "
II	2820"	2d	1.62/1.37	0.17	$4.7 \cdot 10^{-5} m/s$	4.7 " "
II	2820"	A/D=d/8	1.62/1.37	0.17	$1.5 \cdot 10^{-5} m/s$	1.5 " "
III	8100"	2.75d	1.37/0.96	0.36	$2.5 \cdot 10^{-5} m/s$	2.5 " "
III	8100"	2.85d	1.37/0.96	0.36	$2.5 \cdot 10^{-5} m/s$	2.5 " "
III	8100"	2πd	1.37/0.96	0.36	$1.1 \cdot 10^{-5} m/s$	1.1 " "
III	8100"	2d	1.37/0.96	0.36	$3.5 \cdot 10^{-5} m/s$	3.5 " "
III	8100"	A/D=d/8	1.37/0.96	0.36	$1.1 \cdot 10^{-5} m/s$	1.1 " "
IV*	5100"	2.75d	0.96/0.76	0.23	$2.6 \cdot 10^{-5} m/s$	2.6 " "
IV*	5100"	2.85d	0.96/0.76	0.23	$2.6 \cdot 10^{-5} m/s$	2.6 " "
IV*	5100"	2πd	0.96/0.76	0.23	$1.1 \cdot 10^{-5} m/s$	1.1 " "
IV*	5100"	2d	0.96/0.76	0.23	$3.5 \cdot 10^{-5} m/s$	3.5 " "
IV*	5100"	A/D=d/8	0.96/0.76	0.23	$1.1 \cdot 10^{-5} m/s$	1.1 " "

* L'étape n'est pas terminée. On n'a pas marqué un équilibre ou un changement au rythme de l'absorption.

Tableau 5. Les résultats selon la méthode MAAG.

Table 5. The results of MAAG's method.

2.1.4. Injection instantanée

Ferris et als (1962) introduisent la relation $T = \frac{V}{2\pi s \Delta t}$ pour une injection instantanée qui, essentiellement, évite le problème de détermination du coefficient C de la méthode de Maag. Dans cette relation, V est le volume d'eau absorbée dans le temps Δt et s est l'abaissement dans le même temps. Cette relation a été proposée pour des injections dans la nappe, au dessous du niveau piézométrique. Les conditions sur l'application de cette méthode concernent l'existence d'une absorption latérale dans le puits. Ainsi la perméabilité K peut être estimée comme $K = T/a$, A étant l'épaisseur où s'effectue cette absorption (épaisseur effective).

Les conditions expérimentales du puits interviennent pour les paramètres de s et V, qui sont exprimés, presque exclusivement, par la perméabilité

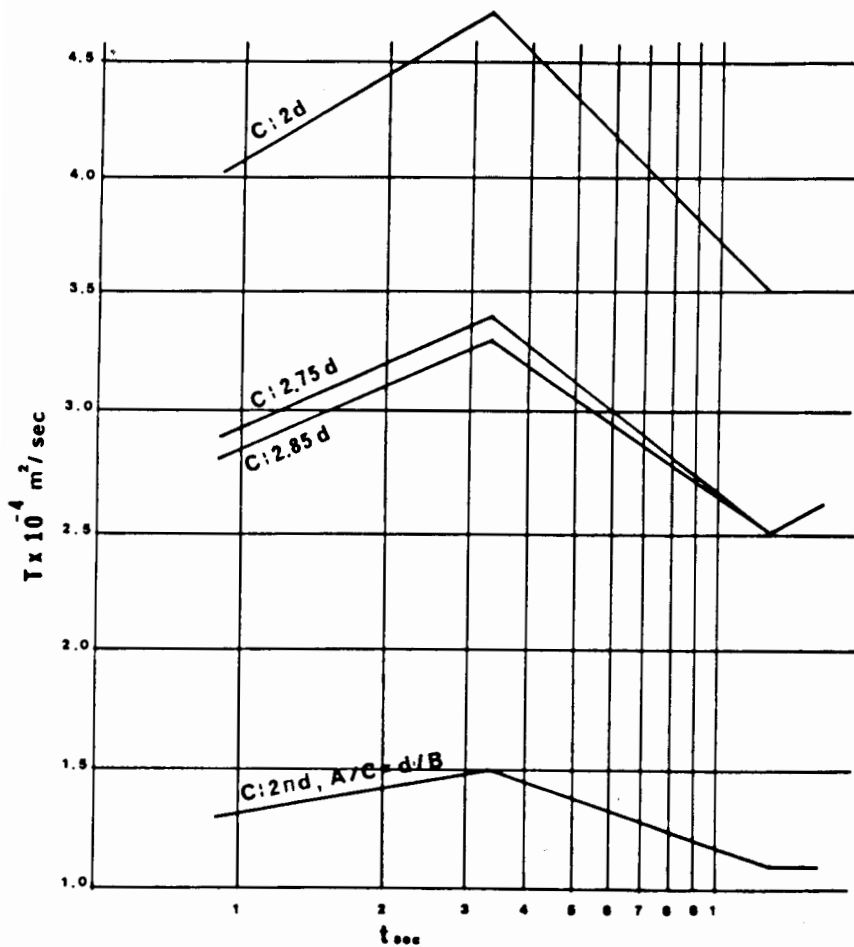


Fig. 3. Variations et comparaison des valeurs de T par rapport au temps pour divers coefficients C.

Fig. 3. Variation and comparison of T values with time for different coefficients C.

verticale de la formation et elles donnent des valeurs de T plutôt conservatives. On surmonte cette difficulté en considérant le "rabattement" après la fin de l'injection. Pour les étapes successives les valeurs de T figurent au tableau suivant.

V (m ³)	T (m ² /sec)
0.1884	4.81·10 ⁻⁴
0.6280	1.54·10 ⁻⁴
1.7584	7.05·10 ⁻⁵
1.1304	8.21·10 ⁻⁵

Tableau 6. Résultats selon la méthode de FERRIS.

Table 6. Results of FERRIS' method.

2.2. TRAITEMENT DES DONNEES DANS LA VOIE DE POMPAGE D'ESSAI

2.2.1. Méthode de PAPADOPOULOS-COOPER

PAPADOPOULOS and COOPER (1967) ont introduit une solution du problème des puits de grand diamètre, pour les nappes captives et sous un régime transitoire (conditions Theis, sauf le grand diamètre). En ce qui concerne l'essai réalisé, il n'y a pas le problème des "pertes de charge" (pompage fictif). La considération mentionnée est utilisée pour deux raisons. En premier, la nappe considérée présente la possibilité d'un changement de son niveau piézométrique pas seulement par l'infiltration directe, mais aussi par l'infiltration latérale déduite des torrents. Donc, le niveau atteint, après l'injection, pourrait être un niveau hydrostatique en période des hautes eaux. Ensuite, l'infiltration par le fond du puits fait que le "rabattement" observé représente exclusivement la capacité de l'aquifère à la Transmissivité de l'eau du puits.

Le facteur de grand diamètre intervient dans la formation de u , en remplaçant la distance classique entre le forage pompé et le piézomètre de mesures. Or, la relation d'écoulement dans ces conditions devient $s_w = \frac{Q}{4\pi T} F(u_w, \beta)$ où $F(u_w, \beta)$ est une jonction dont la valeur résulte des tableaux ou des courbes types. Ainsi, $u_w = \frac{r_w \cdot S}{4Tt}$ et $\beta = \frac{r_w^2 \cdot S}{r_c^2}$, r_w étant le rayon du puits et r_c le rayon effectif, identique, dans notre cas, à celui de r_w (v. méthode "slug").

Avec un débit de pompage négatif $Q = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ et $s_w = 4\text{m}$, la valeur de T devient $4.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ et encore $S = 5.3 \cdot 10^{-2}$ (conjointement à u_w , T , r_c). La courbe expérimentale $\log F(u_w, B) - \log 1/u$ s'identifie avec la courbe $B = 10^{-1}$ et, ainsi $1/u = 15$, $F(u_w, B) = 1$, $s_w = 0.4\text{m}$, $t = 75\text{min}$ (fig.4). En examinant la courbe expérimentale on aperçoit qu'il faut un certain temps avant la déviation de cette courbe par rapport à la courbe type. Donc, le temps t , comme variable des paramètres $F(u_w, B)$ et $1/u$ précise l'existence d'une courbe ayant la forme de Theis, qui, pourtant, n'est pas représentative, puisque l'écoulement autour du puits n'est pas tellement radial.

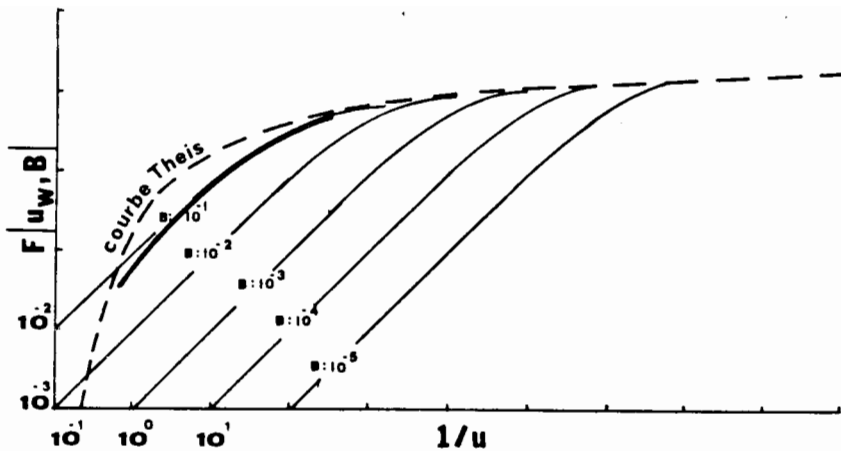


Fig. 4. Coincidence de la courbe expérimentale avec la courbe $B = 10^{-1}$.

Fig. 4. Coincidence of the experimental and the $B = 10^{-1}$ curves.

2.2.2. Méthode de COOPER-JACOB

D'après l'application de la méthode précédente, on pourrait facilement supposer que l'application de la méthode de COOPER et JACOB (pour la solution du problème des conditions de Theis) est valable. Malgré les valeurs de T , dans le cadre défini, ces valeurs ne peuvent pas être acceptées pour trois raisons.

(1) Dans cette méthode le rabattement n'est pas lié à $\log t$, mais directement à t .

(2) Les étapes de l'injection ne correspondent pas aux changements du milieu aquifère, mais à la propagation du cône d'injection, dont les modifications ne sont pas liées seulement à la perméabilité de l'aquifère, mais aussi sont liées aux conditions de l'écoulement souterrain, au débit d'absorption et à la forme de la surface d'absorption dans le puits.

(3) Le temps de l'injection était très court, or les valeurs de u sont plus élevées que 0.01, par conséquent les valeurs estimées ne sont pas acceptables.

2.2.3. Méthode de JACOB-LOHMAN

JACOB et LOHMAN, dans le cadre de l'approche de COOPER-JACOB à la fonction de Theis, ont montré que la vidange d'un puits, à écoulement libre, se modifie d'après l'équation

$$Q = \frac{2\pi T s_w}{2.30 \log (2.25 T t / r_w^2)}$$

Δs (m)	T (m ² /sec)	t ₀ (sec)	S	t (sec)	u
0.08	5.0·10 ⁻⁴	177	0.199	780	0.127
0.35	1.1·10 ⁻⁴	540	0.134	2.820	0.108
0.78	5.2·10 ⁻⁵	1.500	0.176	8.400	0.101
1.31	3.1·10 ⁻⁵	3.360	0.234	3.600	0.524

Tableau 7. Résultats selon la méthode COOPER-JACOB.

Table 7. Results of COOPER-JACOB's method.

Si ceci arrive pour un débit de décharge, qui intervient après une fermeture prolongée d'un puits et après une formation d'une pression vers le haut, doit arriver dans le cas d'une pression vers le bas (injection d'eau). Ceci, en plus, demande que la charge hydraulique est exercée et distribuée sur la même surface de la nappe (surface provoquant la charge vers le haut). Le diagramme $s_w/Q - \log t$ (fig.5) présente trois secteurs bien distincts entre eux, qui correspondent aux secteurs de la courbe $s - \log t$, puisque le débit d'absorption est constant. Les résultats de ce traitement figurent au tableau suivant.

ETAPE	$\Delta s / Q$ (sec/m ²)	t ₀ (sec)	T (m ² /sec)	S
I	400	150	4.57·10 ⁻⁴	3.9·10 ⁻²
II	1.600	560	1.15·10 ⁻⁴	3.5·10 ⁻²
III	3.660	1.660	5.00·10 ⁻⁴	4.6·10 ⁻²

Tableau 8. Résultats selon la méthode JACOB-LOHMAN.

Table 8. Results of JACOB-LOHMAN's method.

L'application de cette méthode dans les conditions d'une nappe libre, de l'absence d'absorption latérale et de grand diamètre du puits, fait que les résultats obtenus ne soient pas acceptables, malgré les valeurs estimées. Une telle application demande une élasticité de la nappe aquifère, donc une nappe captive. Sur ce point les difficultés à surmonter sont très graves.

3ème P A R T I E

3. CONCLUSIONS GENERALES

Très souvent les nécessités d'une étude, en relations avec les conditions et les moyens disponibles, conduisent à l'utilisation des méthodes peu conventionnelles ou des méthodes bien connues, mais assez modifiées, dans le cadre d'une approche aux valeurs des paramètres hydrauliques d'une nappe. Ceci

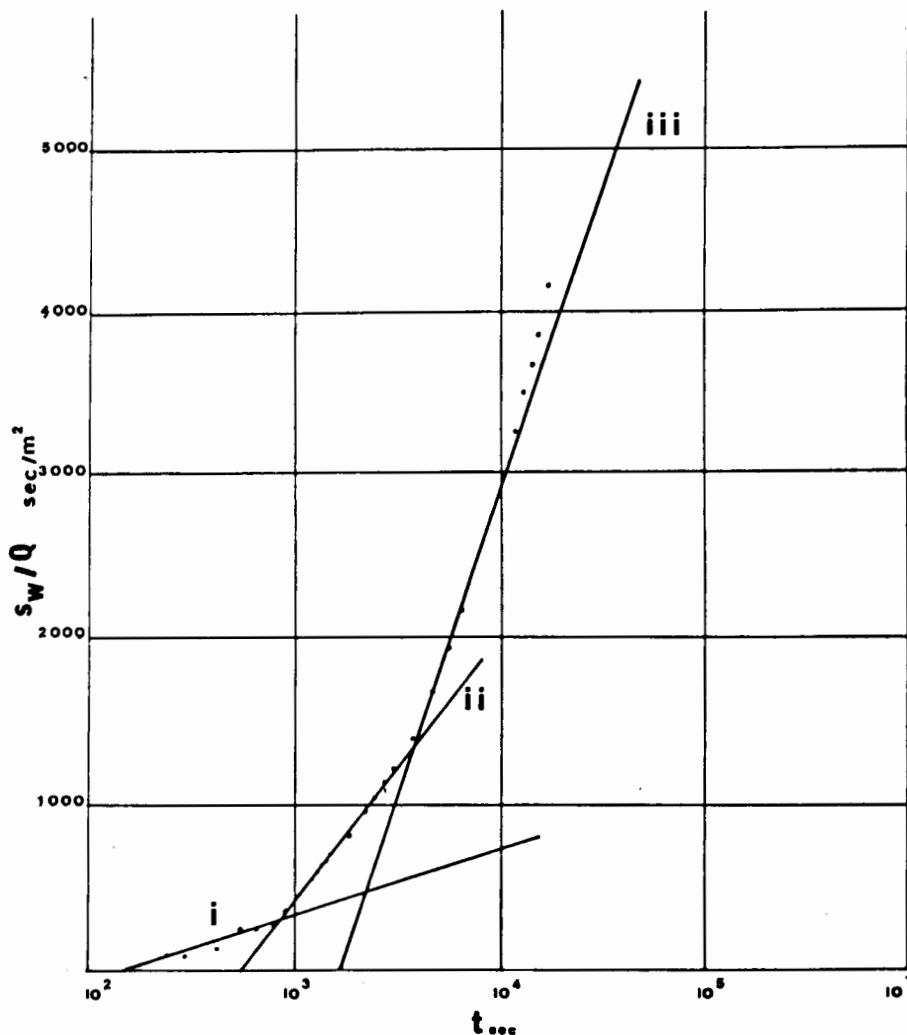


Fig. 5. Solution graphique de la méthode de JACOB-LOHMAN.

Fig. 5. Graphical solution of the JACOB-LOHMAN's method.

introduit à une application des méthodes "en dehors des règles autorisées" et les erreurs qui proviennent d'une telle application peuvent se éliminer par deux moyens.

- par l'analyse des conditions hydrogéologiques et hydrodynamiques, tant de la région envisagée, aussi que d'essai lui-même.
- par les modifications des méthodes envisagées à partir de l'analyse précédente.

Après l'analyse des conditions de l'injection réalisée, les méthodes appliquées, pour l'estimation des paramètres hydrauliques de la nappe, peuvent être distinguées en deux catégories. Dans la première catégorie, se trouvent les essais d'injection qui, essentiellement, sont basées sur les mesures de l'absorption d'eau au cours du temps. Dans la deuxième catégorie se trouvent les "essais de pompage fictif", qui considèrent l'abaissement du niveau d'eau, après l'injection, comme le rabattement d'un essai de pompage. Les conditions d'essai, concernant la durée et la mode de cette injection n'ont pas permis les mesures continues de l'élévation d'eau, qui pourraient, éventuellement, s'utiliser dans la voie de traitement d'un "pompage négatif".

Dans le cas de "pompage fictif", malgré la surmonté, dans la mesure du possible, des plusieurs difficultés et malgré les valeurs numériques obtenues acceptables, on ne peut pas adopter une telle application. La difficulté la plus grave fut le tubage du puits jusqu'au fond, mais il faut signaler que même si on avait des possibilités pour une infiltration latérale, les erreurs existent toujours, limitées, peut-être, si la vitesse d'écoulement souterrain est faible. Dans ce cas, on peu approcher aux paramètres hydrauliques à partir de l'indentification du tableau 3. Par contre les valeurs estimées par les méthodes de la 1ère partie ("essai d'injection") sont assez réelles. Ces valeurs étaient comparées avec les valeurs obtenues par des essais de pompage, ultérieurement réalisés et aussi avec les valeurs du débit spécifique. Sur la dernière corrélation on a trouver que $T \approx q$.

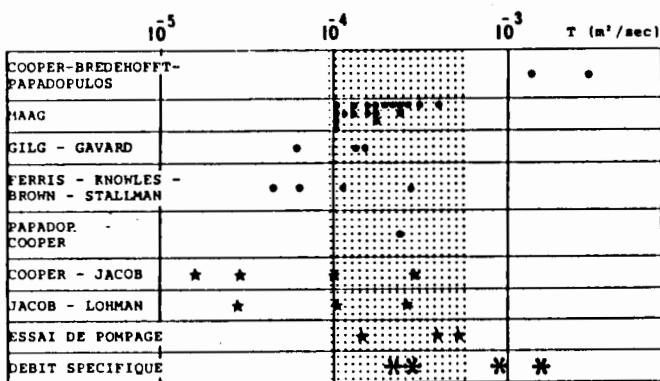


Fig. 6. Comparaison des valeurs de T, déduites des diverses méthodes, entre elles et par rapport aux valeurs de q.

Fig. 6. Comparison of T values resulting from various methods among them and with the q values.

BIBLIOGRAPHIE - REFERENCES

- ARCHAMBAULT, J., BIZE, J., MARGAT, J. (1968). Alimentation artificielle des nappes souterraines. Etude documentaire provisoire. *Bull.B.R.G.M. Sec.III, N°1.*
- ASTIE, H., BOURGEOIS, M., TRUPIN, G. (1969). Représentation cartographique des Transmissivités déterminées en régime transitoire ou déduites du Débit Spécifique. *Bull. B.R.G.M. (2), Sec.III, N°1, 33-42, 3f. 2p.*
- BEAR, J., JACOB, M. (1965). On the movement of water bodies injected into aquifers. *Journ of Hydrol., Vol.III, N°1.*
- BENNETT, R.R. (1962). Flow net analysis. In "Theory of Aquifer tests". *U.S. Geol.Surv. Water Supply Paper, 1536-E, 139-144.*
- BIZE, J., BOURGUET, L., LEMOINE, J. L'alimentation artificielle des nappes souterraines. *Masson et Cie.*
- BOREL, J.P. (1981). La réalimentation artificielle des nappes alluviales. *Ville de Grenoble, Services Techniques.*
- BROWN, R.H., KONOPLYANTSEV, A.A., INESON, J., KOVALEVSKY, V.S. (1972). Ground water studies. An international guide for research and practice. *UNESCO Studies and Reports in Hydrology, 7, p.61, Paris.*
- CAMPEFORT, H. (1964). Injections des sols. *Ed. Eyrolles, Paris.*
- CAZENOVE, E. de (1959). Conséquences pratiques de l'anisotropie des terrains perméables. *Assoc.Int.Hydrol. Mem.II, Liège.*
- COOPER, H.H., BREDEHOEFT, J.D., PAPADOPOULOS, I.S. (1967). Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Res. Research 3,1, 263-269.*
- COOPER, H.H., JACOB, C.E. (1946). A generalised graphical method for evaluating formation constants and summarising well field history. *Am.Geoph.Union Trans. Vol.27, 526-534.*
- GILG, B., GAVARD, M. (1957). Calcul de la Perméabilité par des essais d'eau dans des sondages en alluvions. *Ed.Soc. du Bull.Tech.de la Suisse Romande, Lausanne.*
- FERRIS, J.G., KNOWLES, D.B., BROWN, R.H., STALLMAN, R.W. (1962). Theory of Aquifer Test. *U.S.Geol.Surv.Water Supply Paper 1536-E, pp.104-105.*
- FETER, JR., C.W. (1980). Applied Hydrogeology. *CH.E.MERRILL PUBL.COMP., London.*
- HAZAN, R. (1961). Nappes de Berrechid et de Charf-el-Akab. Mécanismes d'alimentation et d'évaluation des ressources en eaux souterraines. Recharge artificielle. *A.I.H.S., Colloque d'Athènes, 1961.*
- JACOB, C.E., LOHMAN, S.W. (1952). Non steady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Am.Geoph.Union Trans., V.33, 559-569.*
- JETEL, J., KRASNY, J. (1968). Approximative aquifer characteristics in regional hydrogeological study. *Vestnik. Ustr. úst. Géol. 43, 459-461, Prague.*
- JOHNSON DIVISION UNIVERSAL OIL PRODUCTS Co (1972). Ground water and wells. *St. Paul Minnesota, U.S.A.*
- KALLERGIS, G. (1984). Operational hydrogeology. (in Greek). Patras.
- KRUSEMAN, G.P., DE RIDDER, N.A. (1970). Analysis and evaluation of pumping test data. *Int.Inst. for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.*
- LOGAN, J. (1964). Estimating transmissibility from routine production tests of waterwells. *Ground Water, V.2, N°1, 35-37.*
- MARINOS, P. (1974). "Unusual methods calculating transmissivity and about a new method based on springs discharge measurements". *Ann.Géol. Pays Hellén., v.26, pp.367-401.*
- MARINOS, P., DIAMANTIS, J., STOURNARAS, G. (1978). "Les eaux souterraines dans la région de Komotini (Thrace). Un cas des cources phréatiques, d'artésianisme phréatique et des intercommunications des aquifères phréatiques et profondes". *Ann.Géol. Pays Hellén., v.30/2, pp.615-636.*
- MARINOS, P., STOURNARAS, G. (1975). "Possibilité de représentation cartographique des Transmissivités déduites de Débits Spécifiques. Le cas des puits incomplets et de rabattement important dans une nappe libre hétérogène". *Ann.Géol. Pays Hellén., v.27, pp.180-196.*
- MEYER, R.R. (1963). A chart relating well diameter, specific capacity and the coefficient of an unconfined aquifer. *U.S.Geol.Surv.Water Supply Paper, 1536-1*
- PAPADOPOULOS, I.S., COOPER, H.H. (1967). Drawdown in a well of large diameter. *Water Res. Research, 3, 241-244.*
- POLUBARINOVA-COCHINA, P.Y. (1962). Theory of ground water movement. (Translation from Russian). *Princeton Univ.Press.*
- SCHNEEBELI, G. (1966). Hydraulique souterraine. *Eyrolles, Paris.*
- SOCIETE LYONNAISE DES EAUX ET DE L'ECLAIRAGE. L'alimentation de la nappe de Croissy. *Lyon.*
- STOURNARAS, G. (1984). Evolution et comportement d'un système aquifère hétérogène. Géologie et hydrogéologie du delta du Nestos (Grèce) et de ses bordures. *Thèse Univ.Grenoble.*
- TIXERONT, J., DANIEL, J-M. (1967). Alimentation et suralimentaion des nappes souterraines. *Symp.Haifa A.I.H.S., publ.N°72.*
- VACHAUD, G. (1975). Hydrodynamique en milieu poreux. *Inst.Nat.Pol.Grenoble.*
- WALTON, W.C. (1970). Groundwater resource evaluation. *McGraw Hill.*
- Ψηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.