GEOLOGIJA 25/2, 309—325 (1982), Ljubljana

UDK 551.44:551.466(497.12)=40

Transmission des ondes de marée à travers l'aquifère côtier de Kras

Razširjanje valov plimovanja skozi obalni vodonosnik Krasa

Primož Krivic
Geološki zavod, 61000 Ljubljana, Parmova 33

Résumé

L'étude de la propagation d'ondes de marée marine dans l'aquifère côtier de Kras a permis de caractériser le comportement hydrodynamique général de l'aquifère et d'évaluer certains paramètres caractéristiques du milieu, tels que la diffusivité. En étudiant la propagation de ces ondes, nous avons examiné plusieurs modèles hydrogéologiques. Le modèle qui correspond le mieux aux conditions géologiques connues est celui d'une nappe captive avec un effet d'étanchéité partielle du toit de la zone drainante. Ce modèle, ainsi que celui d'une nappe libre avec un effet d'égouttement, permettent la meilleure reconstitution des marées observées.

Kratka vsebina

S študijem razširjanja valov plime in oseke v obalnem vodonosniku Krasa smo lahko ugotovili splošne hidrodinamične lastnosti vodonosnika in določili nekatere značilne parametre, kot na primer difuzivnost. Pri analizi periodičnih nihanj gladine podtalnice smo uporabili več hidrogeoloških modelov. Znanim geološkim razmeram najbolje ustreza model vodonosnika pod pritiskom z delno vodotesnostjo krovnine drenažne cone. Ta model omogoča tudi najboljšo rekonstrukcijo v vodonosniku opazovanih nihanj, enako kot tudi model vodonosnika s prosto gladino in vplivom izcejanja.

Avertissement. Cet article constitue la deuxième partie d'un mémoire sous titre: «Étude hydrodynamique d'un aquifère karstique» présenté par l'auteur en vue d'une soutenance de thèse de Docteur-ingénieur à l'Université Montpellier II, France, année 1981. La suite paraîtra dans le fascicule suivant de la GEOLOGIJA.

Pojasnilo. Članek predstavlja drugi del doktorske disertacije z naslovom: »Študija hidrodinamike kraškega vodonosnika«, ki jo je avtor zagovarjal leta 1981 na Univerzi Montpellier II v Franciji. Nadaljevanje bo izšlo v naslednjem zvezku revije GEOLOGIJA.

1. Objectif de l'étude

Lorsque, sur un littoral les nappes aquifères se déversent en mer, elles sont ainsi en contact avec les eaux libres océaniques dont les fluctuations de niveaux, conséquences des marées, se répercutent sous forme d'ondes de déformation, sur les surfaces piézométriques.

L'étude de la propagation de ces ondes peut permettre, dans des conditions données, de caractériser le comportement hydrodynamique de l'aquifère et d'évaluer certains paramètres caractéristiques du milieu, tel que la diffusivité.

Ce problème sera abordé dans ce chapitre, à propos d'observations effectuées sur des forages des karsts côtiers. En effet, l'aquifère karstique est influencé, tout au moins en partie, comme nous allons le voir, par les marées du Golfe de Trst (Trieste), malgré la faible amplitude de celles-ci.

2. Relations hydrodynamiques entre nappe aquifère et plan d'eau libre

Rappels théoriques

Considérons le système formé par un aquifère semi-infini, d'épaisseur constante en communication avec la mer sur toute sa hauteur.

La fonction $h = h(x, t)$ qui définit la surface piézométrique est solution de l'équation générale de diffusivité hydraulique (J. Boussinesq, 1877; J. Ferris, 1951):

$$\frac{\partial^2 h(x, t)}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h(x, t)}{\partial t} \quad \text{où}$$

S est le coefficient d'emmagasinement

T la transmissivité

h la charge hydraulique

La résolution de l'équation fondamentale est obtenue par deux approches différentes, selon la forme de l'évolution dans le temps du plan d'eau libre,

— soit que cette évolution est de forme quelconque,

— soit qu'elle puisse être assimilée à une sinusoïde.

2.1. *Evolution de forme quelconque*

La résolution de l'équation différentielle ci-dessus dépend de la complexité des conditions aux limites.

Le cas d'un modèle simple est défini par les hypothèses suivantes:

— couche aquifère homogène, isotrope et de même épaisseur dans toute la zone influencée par la marée,

— limite rectiligne entre plan d'eau et aquifère,

— aquifère captif semi-infini,

— libéralisation de l'eau instantanée,

— pas d'autre influence que celle de la marée,

— écoulement laminaire.

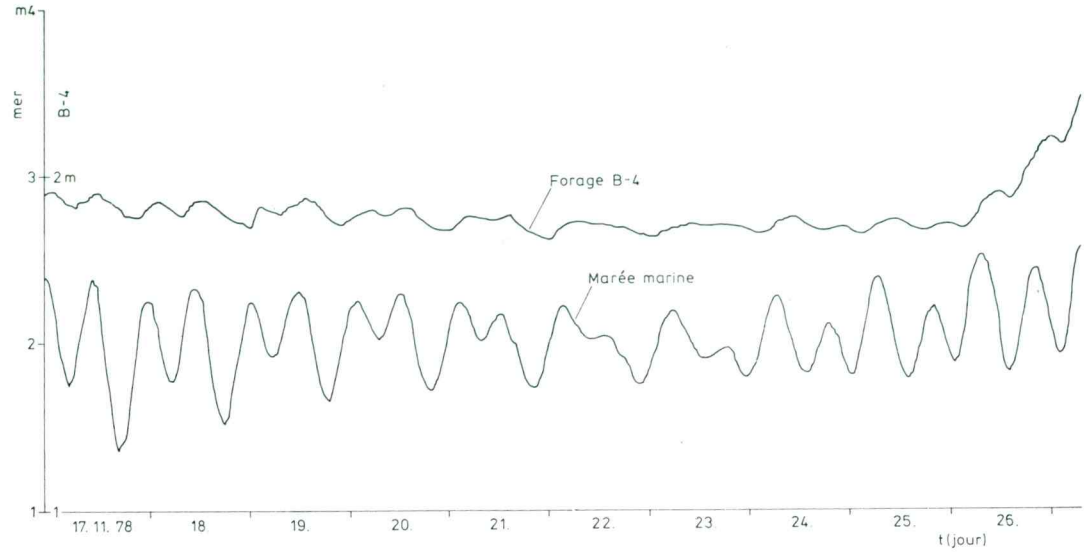

Fig. 1. Propagation d'ondes piézométriques dans l'aquifère côtier
Sl. 1. Razširjanje piezometričnih valov v obalnem vodonosniku

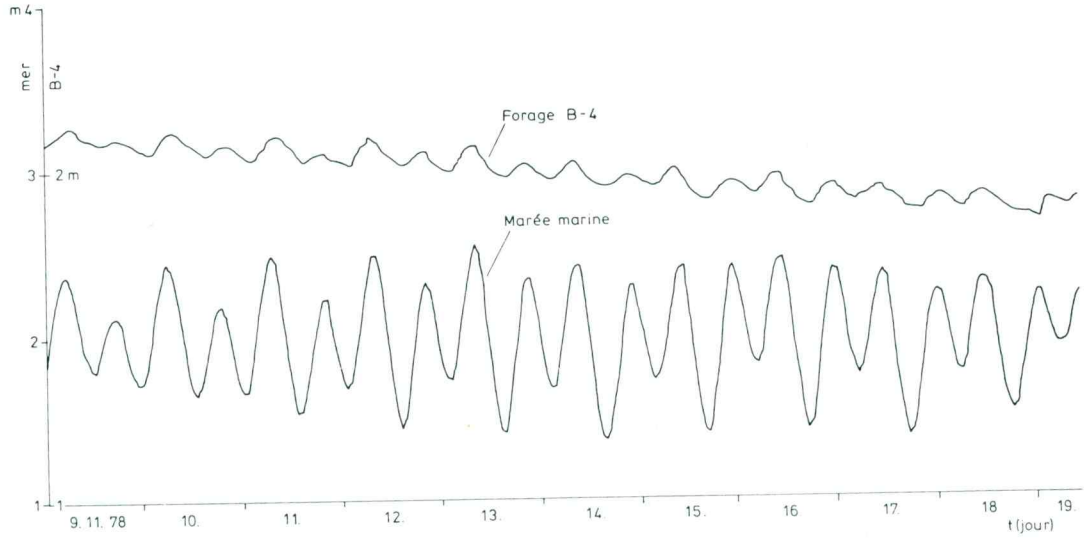

Fig. 2. Propagation d'ondes piézométriques dans l'aquifère côtier
Sl. 2. Razširjanje piezometričnih valov v obalnem vodonosniku

Fig. 3. Vue générale de la vallée de Brestovica. A l'avant plan, au centre, le piézomètre B-4, permettant l'enregistrement des marées dans l'aquifère, est situé dans une doline. Au delà, la mer Adriatique et la bouche de la rivière Soča à l'arrière plan

Sl. 3. Dolina Brestovice. V ospredju, v srednjem delu slike je v manjši vrtači piezometer B-4, ki omogoča meritve plimovanja v vodonosniku, v ozadju pa je Jadransko morje in ustje reke Soče

On considère la fonction h (x, t) satisfaisant aux conditions aux limites suivantes:

$$h(x, t) = 0 \quad \text{pour} \quad t < 0$$
$$h(0, t) = h_0 \quad \text{pour} \quad t \geqslant 0$$

Après une remontée brusque h_0 sur une nappe initialement horizontale, ou après un abaissement brusque h_0 de la cote du plan d'eau libre, on obtient, pour les charges h à la distance x de cette limite, l'expression suivante:

$$h(x, t) = h_0 \operatorname{erfc} \sqrt{x^2 S / 4 T t}$$

qui représente la résolution de l'équation fondamentale obtenue par double transformation de CARSON-LAPLACE (M. Bonnet et J. Schneider. 1969).

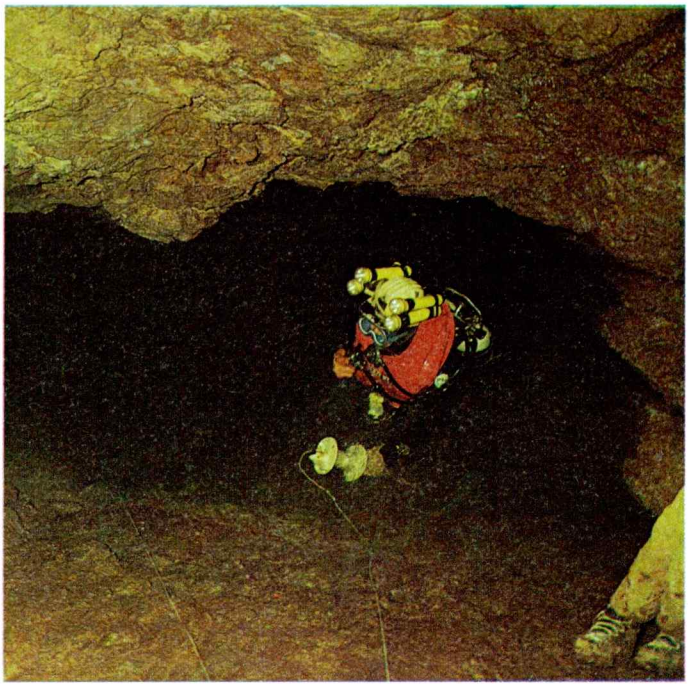

Fig. 4. Piézomètre naturel Drča jama. Exploré par les plongeurs jusqu' à la profondeur de 15 m sous le niveau de la mer. Les fluctuations de niveau piézométrique sont enregistrés dans le forage B-5 qui recoupe le chenal immergé de l'aven Drča jama à la profondeur de 66,7 m à 72,5 m

Sl. 4. Naravni piezometer Drča jama. Potapljači so raziskali podvodni rov do globine 15 m pod gladino morja. Nihanja gladine podtalnice beleži limnigraf na vrtini B-5, ki je prevrtala podvodni kanal Drče jame v globini od 66,7 m do 72,5 m

La fonction erfc («fonction erreur complémentaire») est définie par l'intégrale suivante:

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-x^2}\, dx \qquad \text{avec}$$

$$u = \sqrt{x^2\, S / 4\, T\, t}$$

En appliquant le théorème de superposition des états transitoires, la solution élémentaire précédente peut être étendue aux cas plus complexes.

La solution générale h (x, t) devient alors:

$$h(x, t) = h_0 \operatorname{erfc} \sqrt{x^2\, S / 4\, T\, t} + \Sigma_i\, (h_i - h_{i-1}) \operatorname{erfc} \sqrt{x^2\, S / 4\, T\, (t - t_i)}$$

La méthode de transformation de CARSON-LAPLACE a été appliquée par différents auteurs pour le calcul de diffusivité, notamment en milieu poreux: M. Bonnet et J. Schneider (1969), R. Degallier (1969), P. Peaudecerf (1973), mais aussi en milieu fissuré: J. C. Garnier et C. L. Clarion (1967), M. Razack, C. Drogue, C. Romariz et C. Almeida (1980).

2.2. *Evolution de forme sinusoïdale*

2.2.1. *Nappe captive*

La propagation d'ondes piézométriques dans l'aquifère côtier peut être représentée par la résolution de l'équation différentielle de base de l'hydrodynamique souterraine, avec les conditions aux limites suivantes (J. Boussinesq, 1877; J. Ferris, 1951):

$$h(x, t) = h_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right) \quad \text{pour } x = 0$$

$$\text{et} \quad h(x, t) = 0 \quad \text{pour } x = \infty$$

h_0 étant la demi amplitude et t_0 la période de fluctuation du plan d'eau libre.

En faisant les mêmes hypothèses que dans le chapitre précédent, on obtient la solution suivante pour le mouvement de la surface piézométrique dans une nappe captive (modèle BOUSSINESQ):

$$h(x, t) = h_0 e^{-2\pi x/l} \sin 2\pi (t/t_0 - x/l)$$

$$\text{avec} \quad l = \sqrt{4\pi t_0 T/S} \quad \text{— longueur d'onde}$$

d'où la demi amplitude h_x des fluctuations de surface piézométrique à la distance x du rivage:

$$h_x = h_0 e^{-x\sqrt{\pi S/t_0 T}}$$

et la vitesse V de transmission de l'onde:

$$V = x/t = l/t_0 = \sqrt{4\pi T/t_0 S}$$

La diffusivité $D = T/S$ peut être aisément calculée,

— soit à partir de l'amortissement de l'amplitude:

$$D = T/S = \frac{x^2 \pi}{t_0 \left(\ln \frac{h_0}{h}\right)^2}$$

— soit à partir du déphasage:

$$D = T/S = \frac{t_0 x^2}{4\pi t^2}$$

Cette démarche, très classique, à partir de l'équation de BOUSSINESQ, a été reprise et développée par J. Ferris (1951), puis largement utilisée pour l'interprétation des fluctuations périodiques dans les nappes alluviales (G. Trupin -1969-, R. Degallier -1969-, E. De Cazenove -1971-,

R. Degallier -1978-) ainsi que dans les aquifères karstiques (L. Moullard, B. Mijatović, R. Kareh et B. Masaad -1965-, J. C. Garnier et C. L. Clarion -1967-, M. Razack, C. Drogue, C. Romariz et C. Almeida -1980-).

2.2.2. *Nappe semi-captive*

Supposons maintenant que l'aquifère étudié (perméabilité horizontale K, épaisseur M) soit en communication à travers son éponte semi-perméable (perméabilité verticale K', épaisseur M') avec une nappe à niveau d'eau constant. C'est le schéma classique de la drainance.

D'après E. De Cazenove (1971), la grandeur caractéristique B (distance de drainance):

$$B = \sqrt{M\,M'\,K/K'}$$

est liée à un paramètre δ différent de zéro, caractérisant l'intensité de la drainance, par:

$$\delta^2 - \frac{1}{\delta^2} = \frac{x_0^2}{B^2} \quad \text{avec} \quad x_0 = \sqrt{\frac{T\,t_0}{S\,\pi}}$$

L'équation de diffusivité et sa solution s'écrivent:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{2\,\partial h}{\partial\left(\frac{2\,\pi\,t}{t_0}\right)}\right) = \frac{x^2}{B^2} h$$

$$h\,(x, t) = h_0\, e^{-\frac{\delta x}{x_0}} \sin\left(\frac{2\,\pi\,t}{t_0} - \frac{x}{x_0\,\delta}\right)$$

Les valeurs de l'amortissement et du déphasage permettent de déduire x_0/δ d'une part, et $x_0\,\delta$ d'autre part, d'où x_0, δ et B. A partir de ces valeurs la diffusivité D peut être calculée aisément.

2.2.3. *Nappe libre*

Dans la mesure où les variations périodiques du niveau h sont faibles par rapport à l'épaisseur de la zone saturée de l'aquifère, il est admis d'appliquer les équations valables pour les nappes captives (E. De Cazenove, 1971).

2.2.4. *Nappe libre avec un effet d'égouttement*

Dans le cas d'un aquifère libre, avec un effet d'égouttement non négligeable, en communication directe avec la mer (la méthode d'interprétation présentée ci-après suppose maintenues toutes les autres hypothèses du § 2.1.), l'équation de la diffusivité s'écrit (par analogie avec le phénomène de drainance):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial X^2} - 2\frac{\partial h}{\partial\left(\frac{2\,\pi\,t}{t_0}\right)} = \frac{x_0^2}{(B')^2} h \quad \text{avec}$$

Fig. 5. Aven Drča jama. On aperçoit, derrière l'échelle limnimétrique, le plan d'eau rabattu par le pompage d'essai dans le forage B-5

Sl. 5. Drča jama. Za vodomerno letvijo lahko opazimo vodno gladino sifonskega jezera, ki se je znižala zaradi črpalnega poizkusa na vrtini B-5

$X = x/x_0$ — distance réduite

$B' = \sqrt{\frac{T}{\alpha S'}}$ — facteur d'égouttement

S' — coefficient d'emmagasinement retardé de la couche aquifère

$1/\alpha$ — indice de retard de BOULTON.

La solution générale h (x, t) est la suivante:

$$h(x, t) = h_0 e^{-\beta x} \sin\left(\frac{2\pi t}{t_0} - \frac{X}{\beta}\right) \quad \text{avec}$$

β qui est un paramètre différent de zéro intervenant dans le facteur d'égouttement B′:

$$\beta^2 - \frac{1}{\beta^2} = \frac{x_0^2}{B'^2}$$

A partir de l'amortissement et du déphasage, on obtient les valeurs de x_0, β et B′. La diffusivité T/S peut donc être calculée aisément.

3. Conditions expérimentales

3.1. *Données géologiques et hydrogéologiques*

Rappelons que l'épaisseur de la série carbonatée aquifère est très grande, car ni les forages de reconnaissance ni la prospection géophysique (sondages électriques) n'ont pu découvrir le substratum imperméable (F. Drobne, P. Krivic, D. Ravnik et U. Premru, 1977). Il n'y a pas non plus de recouvrement sauf des dépôts d'argiles de décalcification dans les dolines, mais qui ne font pas partie de la zone saturée de l'aquifère. Il est donc plausible d'envisager l'hypothèse d'une nappe libre avec des variations piézométriques négligeables par rapport à l'épaisseur de la zone saturée.

Mais il faut noter qu'il y a eu probablement, au moins sur la zone proche du littoral, un développement karstique important sous le niveau actuel de la mer, du fait des régressions marines du Tertiaire et du Quaternaire.

Effectivement, les plongeurs spéléologues connaissent de nombreux chenaux karstiques à des profondeurs sous la mer de l'ordre de 30 à 50 m. De la sorte, on peut envisager l'existence d'une zonation plus ou moins horizontale de la conductivité hydraulique du karst, et des circulations actuelles en conduits localement en charge.

L'écoulement n'est évidemment pas totalement en charge, car les calcaires affleurent largement et sont parcourus de fractures ouvertes subverticales.

3.2. *Marée dans le Golfe de Trst (Trieste)*

L'Adriatique est une mer intérieure, à forme allongée, dirigée du NW vers le SE. Dans la partie septentrionale, les profondeurs sont modérées, mais l'amplitude de marées est plus grande que celle d'autres régions méditerranéennes (F. Mosetti et M. Picotti, 1960).

Cette amplitude augmente, peu à peu, vers le Nord jusqu'au Golfe de Trieste où elle atteint un maxima de 0,6 et même de 0,9 m. Il s'agit d'une marée semi-diurne avec une période de 12 h 25 m et (ou) d'une marée mixte avec deux maxima, dont l'un est prédominant. L'allure très complexe de la marée observée (fig. 1) est dûe notamment à la forme particulière de l'Adriatique et également à l'influence des vents dominants (bora, siroco) qui agissent sur le niveau marin en l'abaissant ou en le surélevant selon leur direction.

3.3. *Observations disponibles*

Les premiers renseignements sur les fluctuations de la nappe datent d'avril 1977, époque à laquelle nous avions installé des limnigraphes permettant un enregistrement continu des niveaux piézométriques dans les forages.

Ensuite, dans le cadre des travaux de reconnaissance de l'aquifère côtier, des enregistrements (voir fig. 2) ont été réalisés dans les piézomètres B-4 (fig. 3) et B-5 (fig. 4, 5), distants de 4000 m de la côte, ainsi que sur le marégraphe situé dans le Golfe de Trst (Trieste).

Durant la période d'observations du 28. 4. 1977 au 12. 12. 1978, le phénomène de marée est apparu quatorze fois avec des amplitudes sur les forages de 2 à 10 cm. La période ininterrompue des fluctuations du niveau piézométrique

la plus longue a duré du 25. 10. 1978 au 12. 12. 1978, soit 49 jours. Cette période correspond à un étiage d'automne prolongé.

Pour l'application pratique des modèles d'interprétation présentés dans le paragraphe 2, nous avons utilisé les enregistrements réalisés dans le forage B-4 qui sont d'une très bonne qualité.

4. **Propagation de la marée dans l'aquifère karstique**

4.1. *Hypothèse d'une nappe captive*

4.1.1. *Application de la transformation de CARSON-LAPLACE*

Nous avons d'abord appliqué la méthode utilisant la double transformation de CARSON-LAPLACE. Les calculs effectués sur les données du piézomètre B-4 distant de 4000 m de la côte fournissent une diffusivité: $D = 193\ m^2/s$.

A l'aide de cette valeur de T/S et des conditions aux limites (marée marine observée), il est possible de déterminer la courbe théorique des fluctuations du niveau piézométrique dans le B-4. Les calculs sont effectués à l'aide du programme informatique HYGP 1 (P. Peaudecerf, 1973).

Les fluctuations piézométriques observées et calculées sont reportées sur la figure 6. La courbe théorique ne coïncide pas avec la courbe observée. C'est donc que l'hypothèse d'une nappe captive ne subissant aucune autre influence

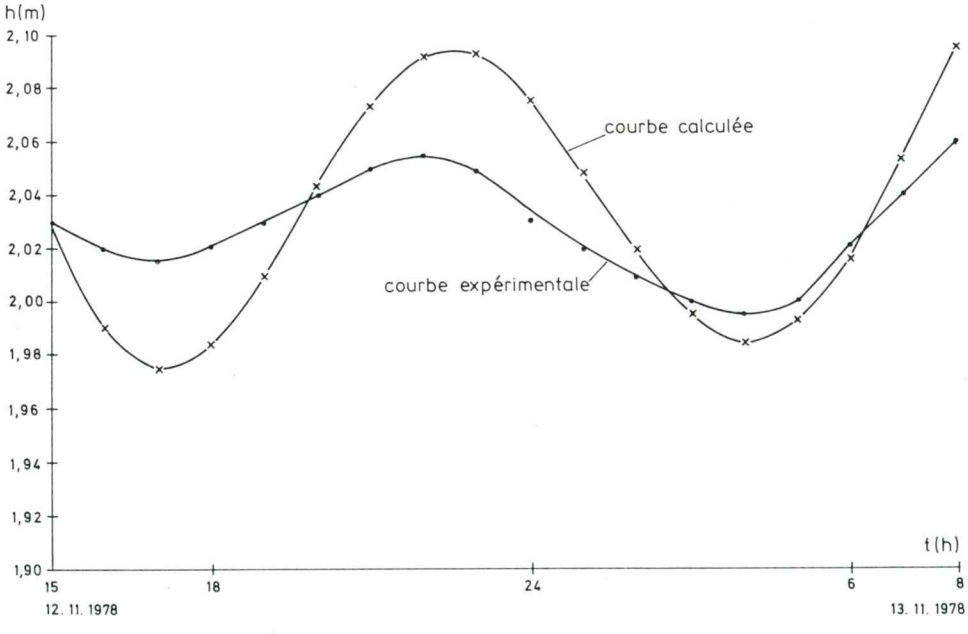

Fig. 6. Reconstitution des fluctuations sur le forage B-4 par application de la transformation de Carson-Laplace

Sl. 6. Rekonstrukcija nihanj gladine podtalnice v vrtini B-4 po metodi Carson-Laplace

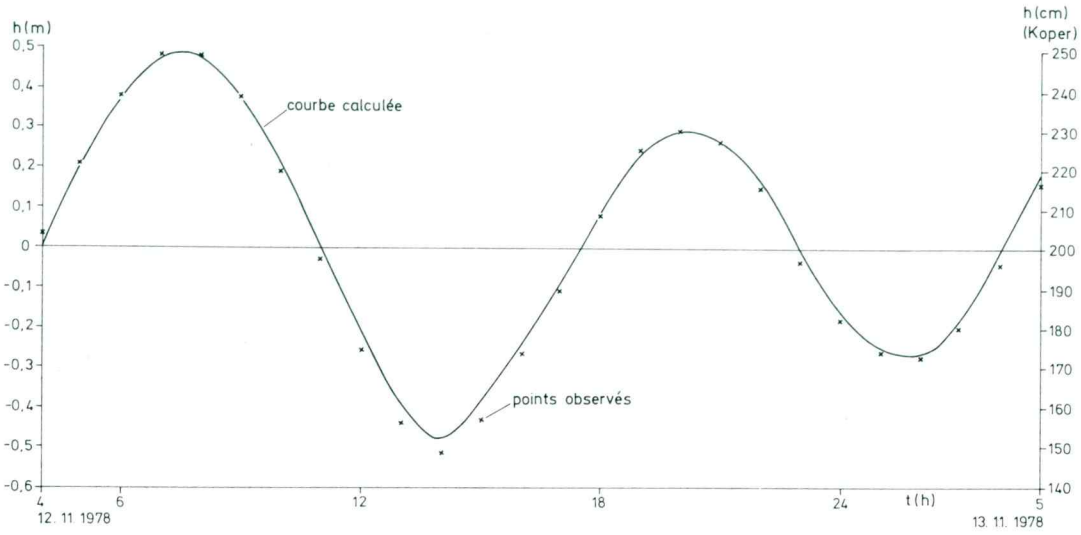

Fig. 7. Reconstitution de la marée dans le Golfe de Trst
Sl. 7. Rekonstrukcija plimovanja morja v Tržaškem zalivu

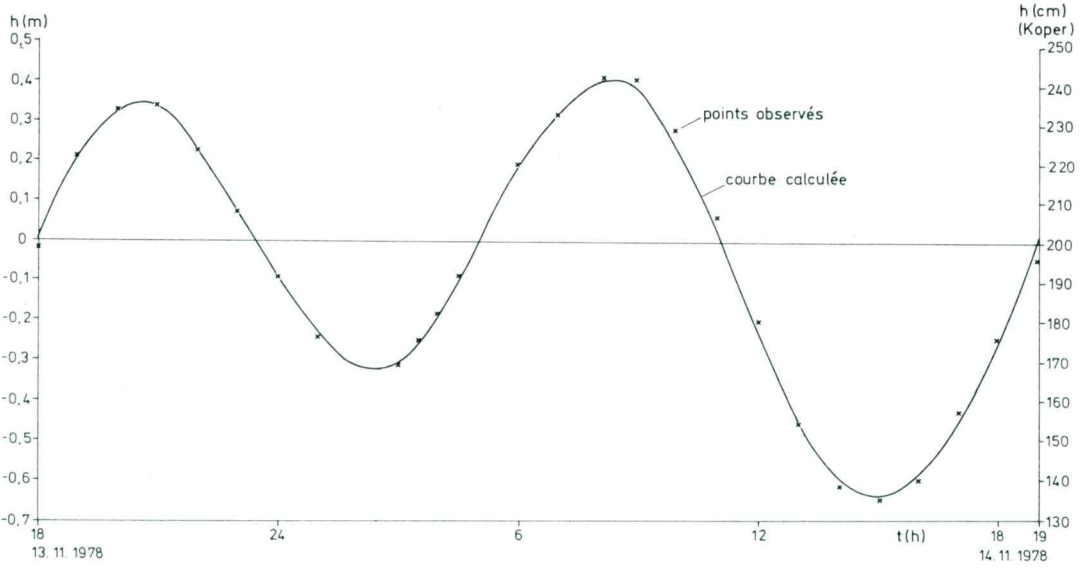

Fig. 8. Reconstitution de la marée marine
Sl. 8. Rekonstrukcija plimovanja morja

que celle de la marée n'est pas verifiée et qu'il faut faire intervenir d'autres facteurs; soit le phénomène de débit retardé et d'égouttement, soit l'effet d'étanchéité partielle du toit de la zone drainante, comme nous le verrons plus loin.

4.1.2. *Nappe captive (évolution sinusoïdale)*

La diffusivité est calculée à l'aide de l'amortissement de l'amplitude et du déphasage. La marée est très irrégulière dans le Golfe de Trieste. Sa forme précise est obtenue en analysant les enregistrements avec des intervalles de temps de 6 à 12 heures (fig. 7). Pour chaque intervalle sont recherchées l'amplitude et la période apparentes (fig. 8). Ces valeurs permettent de calculer la grandeur x_0 qui contient l'inconnue T/S que l'on cherche à déterminer.

L'interprétation consiste ensuite à reproduire les fluctuations dans le forage B-4. Les resultats obtenus sont présentés dans le tableau 1 et les fig. 9 et 10.

Il faut noter que les paramètres calculés d'après le déphasage sont systématiquement plus élevés que ceux obtenus à l'aide de l'amortissement, les moyennes étant une fois et demi plus fortes.

4.2. *Hypothèse d'une nappe libre avec un effet d'égouttement*

Dans ce modèle, on envisage l'hypothèse de libération progressive de l'eau dûe au drainage de la hauter dénoyée. Ce phénomène d'égouttement se manifeste notamment dans les zones à minces fissures où la libération de l'eau est retardée dans une certaine mesure.

Comme précédemment, les rapports d'amplitudes et les déphasages ont été reproduits par le modèle. La courbe de réponse théorique a été ainsi déterminée. Elle coïncide bien avec la courbe réellement observée (fig. 11). Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 2.

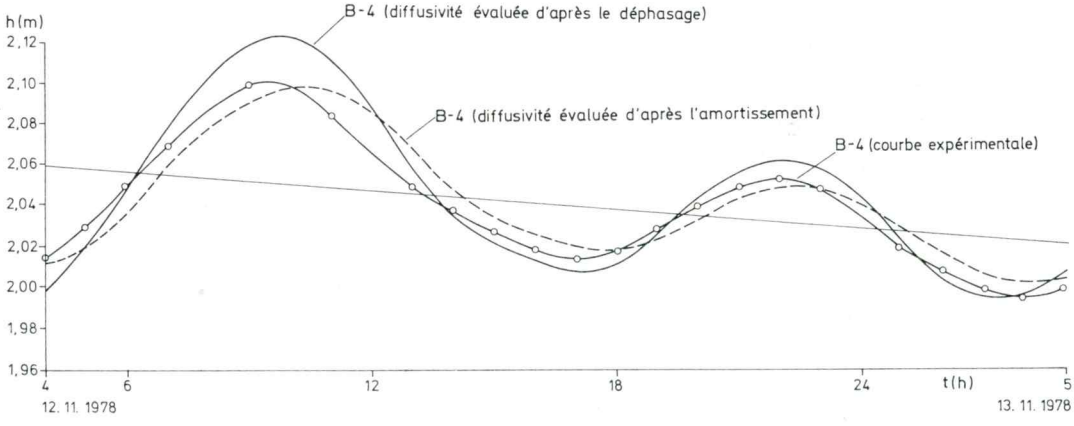

Fig. 9. Reconstitution des fluctuations au forage B-4 (nappe captive, modèle Boussinesq)

Sl. 9. Rekonstrukcija nihanj v vrtini B-4 po Boussinesqovem modelu za vodonosnik pod pritiskom

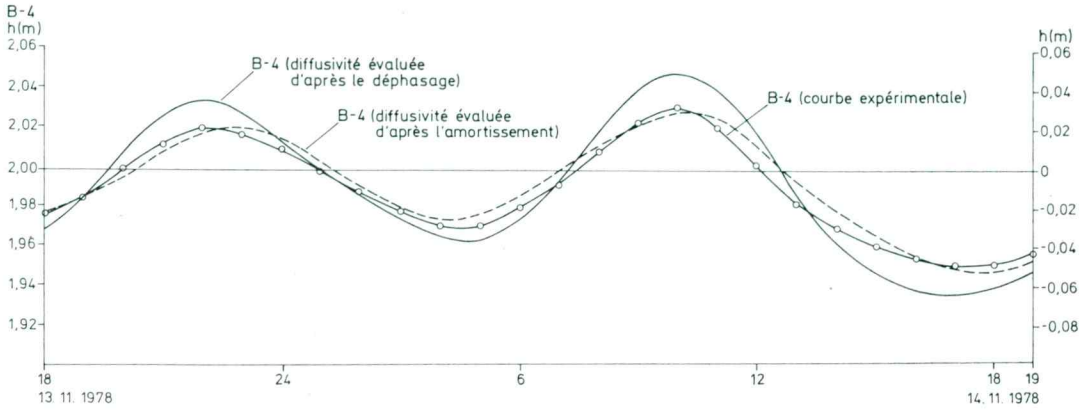

Fig. 10. Reconstitution des fluctuations au forage B-4 (nappe captive, modèle Boussinesq)

Sl. 10. Rekonstrukcija nihanj v vrtini B-4 po Boussinesqovem modelu za vodonosnik pod pritiskom

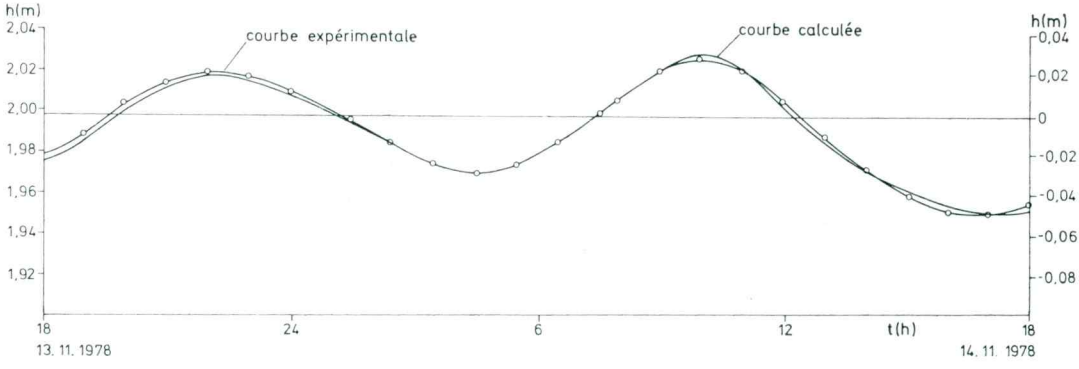

Fig. 11. Reconstitution des fluctuations au forage B-4 (nappe libre avec un effet d'égouttement, marée sinusoïdale)

Sl. 11. Rekonstrukcija nihanj v vrtini B-4 za vodonosnik s prosto gladino in izcejanjem ter sinusoidalnim plimovanjem

Ces valeurs sont plus cohérentes que les précédentes et les écarts à leur moyenne sont inférieurs à 10 %. On obtient ainsi des valeurs de B′ et D moins dispersées que dans les calculs antérieurs.

4.3. *Hypothèse d'une nappe captive avec un effet d'étanchéité partielle du toit de la zone drainante*

L'aquifère a été décrit comme étant de forme d'un niveau très conducteur — et capacitif — surmonté par une zone relativement moins karstifiée.

Tableau 1. Résultats d'interprétation d'après la méthode de Boussinesq (nappe captive)

Tabela 1. Rezultati interpretacije po Boussinesqovi metodi za vodonosnik pod pritiskom

1/2 amplitude (h) et (h_o) et période t_o observées	Diffusivité calculée d'après le déphasage	Diffusivité calculée d'après l'amortissement
h = 0,050 m	h = 0,073 m	h = 0,049 m
t_o = 14,0 h	ϕ = 4,2 h	ϕ = 5,1 h
h_o = 0,49 m	x_o = 2228 m	x_o = 1753 m
	D = 309,5 m^2/s	D = 191,6 m^2/s
h = 0,023 m	h = 0,032 m	h = 0,020 m
t_o = 13,3 h	ϕ = 3,6 h	ϕ = 4,3 h
h_o = 0,30 m	x_o = 2117 m	x_o = 1557 m
	D = 293,9 m^2/s	D = 159,2 m^2/s
h = 0,022 m	h = 0,036 m	h = 0,022 m
t_o = 11,0 h	ϕ = 3,6 h	ϕ = 4,3 h
h_o = 0,35 m	x_o = 1751 m	x_o = 1446 m
	D = 243,2 m^2/s	D = 165,9 m^2/s
h = 0,030 m	h = 0,038 m	h = 0,024 m
t_o = 11,0 h	ϕ = 3,8 h	ϕ = 4,5 h
h_o = 0,33 m	x_o = 1751 m	x_o = 1668 m
	D = 243,2 m^2/s	D = 220,8 m^2/s
h = 0,032 m	h = 0,049 m	h = 0,031 m
t_o = 12,6 h	ϕ = 3,8 h	ϕ = 4,5 h
h_o = 0,43 m	x_o = 2005 m	x_o = 1540 m
	D = 278,5 m^2/s	D = 164,2 m^2/s
Moyenne	D = 273,7 m^2/s	D = 180,3 m^2/s

Aussi, peut-on retenir par analogie, un modèle de nappe captive présentant une étanchéité partielle à son toit. Avec:

$X = x/x_0$: distance réduite;

$B'' = \sqrt{\frac{T}{\alpha S''}}$: facteur d'étanchéité partielle du toit de la zone drainante.

Un facteur d'étanchéité B″ élevé correspond à un écoulement plutôt en charge. Les ondes piézométriques sont alors peu modifiées. Inversement, si B″ est faible, l'influence de l'effet d'étanchéité partielle devient considérable.

Tableau 2. Résultats d'interprétation d'après la méthode tenant compte de l'effet d'égouttement (nappe libre)

Tabela 2. Rezultati interpretacije po metodi, ki upošteva izcejanje pri vodonosnikih s prosto gladino

1/2 amplitude (h) et (h_o) et période t_o observées	1/2 amplitude (h) et déphasage (ϕ) calculés	Valeurs de la diffusivité et des autres grandeurs caractérisant l' égouttement
h = 0, 022 m t_o = 11 h h_o = 0, 35 m	h = 0, 022 m ϕ = 3, 6 h	β = 1, 1005 B' /x_o = 1, 6112 x_o = 1591 m B' = 2563 m D = 200, 8 m^2/s
h = 0, 030 m t_o = 11 h h_o = 0, 33 m	h = 0, 028 m ϕ = 3, 9 h	β = 1, 0245 B' /x_o = 3, 2164 x_o = 1709 m B' = 5496 m D = 231, 7 m^2/s
h = 0, 032 m t_o = 12, 6 m h_o = 0, 43 m	h = 0, 049 m ϕ = 4, 5 h	β = 1, 1413 B' /x_o = 1, 3675 x_o = 1757 m B' = 2403 m D = 213, 8 m^2/s
Moyenne		D = 215, 4 m^2/s

La dimension de B″ est celle d'une longueur: L
S″: coefficient d'emmagasinement retardé
$1/\alpha$: indice de retard

La solution générale h(x, t) est la même que dans le cas d'une nappe libre avec un effet d'égouttement; les calculs sont identiques.

5. Conclusion

En étudiant la propagation d'ondes piézométriques dans l'aquifère côtier, sous l'effet des marées marines, nous avons examiné plusieurs modèles hydrogéologiques. Notre démarche a été de chercher par tâtonnements une superposition entre les courbes expérimentales et les figures dérivées des lois théoriques. Seul le cas d'écoulements parallèles a été traité, et les paramètres hydrodynamiques ont été considérés comme constants dans l'espace et dans le temps.

Le modèle qui correspond le mieux aux conditions géologiques connues est celui d'une nappe captive avec un effet d'étanchéité partielle du toit de la zone

drainante. Ce modèle, ainsi que celui d'une nappe libre avec un effet d'égouttement, permettent la meilleure reconstitution des marées observées. Le choix entre ces deux modèles reste pourtant difficile car il est bien certain que la nappe n'est ni parfaitement captive ni tout à fait libre.

Nous donnons dans la suite quelques justifications de notre choix, tout d'abord sur la différence entre la célérité de propagation d'ondes piézométriques et la vitesse propre des particules d'eau. Il y a évidemment une différence importante entre la célérité d'ondes qui se propagent dans l'aquifère étudié et la vitesse effective de l'eau. Des célérités élevées indiqueraient un écoulement en charge. Le traçage effectué à partir de la perte de la Notranjska Reka (F. Bidovec, 1965) a donné le temps de passage de l'eau entre cette perte et les sources de Timav de 16 jours, d'où la vitesse apparente de 90 m/h. En ce qui concerne la célérité, nous avons montré (P. Krivic, 1981) que le temps de passage d'ondes de crue sur le même chemin n'est que de deux jours et la célérité de 730 m/h.

A signaler aussi que l'effet d'étanchéité partielle n'est pas très important dans l'aquifère étudié; β étant voisin de 1 ($\beta = 1{,}141$). L'écoulement se fait donc surtout en charge.

Les essais par pompage dans le forage B-4 ont fourni une transmissivité apparente de 10^{-1} m²/s. Si l'on estime la porosité efficace d'une nappe libre à 1 %, la diffusivité serait donc de l'ordre de 10 m²/s. Pour une nappe captive avec un coefficient d'emmagasinement $10^{-3} < S < 10^{-4}$ la diffusivité $D = T/S$ serait de 100 m²/s à 1000 m²/s.

D'après le modèle, la valeur de diffusivité de l'ordre de 200 m²/s pourrait être retenue pour la zone drainante dans laquelle se situent le forage B-4 et les sources côtières. Cette valeur est bien dans la fourchette caractérisant le secteur étudié.

Bibliographie

Bonnet, M. & Schneider, J. 1969. Un exemple d' application de la méthode de Carson-Laplace pour l'étude des relations entre nappe et rivière. Analyse des variations du niveau du Chari sur la nappe de la depression Tchadienne. Mém. BRGM. no 76, pp. 53—89.

Boussinesq, J. 1877. Essai sur la théorie des eaux courantes. Mém. Acad. Sci. Paris, Imprimerie Nationale, Paris, 252 pp.

De Cazenove, E. 1971. Ondes phréatiques sinusoïdales. La Houille Blanche, no 7, pp. 601—615.

Degallier, R. 1969. Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes. Bull. BRGM. 2ème série, section III. no 2, pp. 7—56.

Degallier, R. 1978. Propagation de fluctuations périodiques dans une nappe semi-captive non illimitée. Application à la nappe de Moulineaux (Rouen). Rapport BRGM 78 SGN 319 HYD, 14 p., Orléans.

Drobne, F., Krivic, P., Ravnik, D. & Premru, U. 1977. Študija o podzemeljski vodi v Tržaško-komenskem krasu, I. faza, leto 1976/77. Rapport GZL, Ljubljana.

Ferris, J. 1951, Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. Assoc. Int. Hydrol. Sci., Assem. Gén. Bruxelles. t II. 148 pp.

Garnier, J. C. & Clarion, C. L. 1967.Transmission des ondes de crue du Verdon à travers le massif d'appui rive droite du futur barrage de Sainte-Croix. La Houille Blanche, no 1, pp. 61—71.

Krivic, P. 1981. Étude hydrodynamique d'un aquifère karstique côtier: le Kras de Slovenie, Yougoslavie. Thèse Doct. Ing. Univ. Montpellier. 108 ., Montpellier.

Krivic, P. & Drobne, F. 1980. Hidrogeološke raziskave Tržaško-komenskega krasa. Zbornik 6. Jug. simp. hidrogeol. inž. geol., 1, pp. 233—239. Portorož.

Mosetti, F. & Picotti, M. 1960. Actualité sur les recherches de thalassographie dans la mer Adriatique. Boll. Soc. Adr. Sc., 1, pp. 73—77.

Moullard, L., Mijatović, B., Kareh, R. & Massaad, B. 1965. Exploitation d'une nappe karstique captive à exutoires sous-marins. Problèmes posés et solution adoptée. Côte libanaise. Actes Coll. Dubrovnik. AIHS-UNESCO, 1, pp. 237—250.

Peaudecerf, P. 1973. Relations entre une nappe alluviale et un cours d'eau de surface. Les programmes HYGP1-HYGP2. Bull. BRGM. 2ème série, section III. nº 2, pp. 77—85.

Razack, M., Drogue, C., Romariz, C. & Almeida, C. 1980. Étude de l'effet de marée océanique sur un aquifère carbonate côtier (Miocène de l'Algarve — Portugal). Journ. Hydrol., 45, pp. 57—69.

Todd, D. K. 1964. Ground water Hydrology. John Wiley & Sons, 336 p., New York.

Trupin, G. 1969. Étude des caractéristiques hydrauliques d'un aquifère captif par l'observation des effets de pression dus à la marée océanique. Mém. BRGM. nº 76. pp. 359—378.