

**Razack, M., C. Drogue, C. Romariz e C. Almeida  
(1980)  
Étude de l'effet de marée océanique sur un aquifère  
côtier (Miocène de l'Algarve - Portugal)**

Journal of Hydrology, 45, p. 57-69.

[4]

## **ÉTUDE DE L'EFFET DE MARÉE OCÉANIQUE SUR UN AQUIFÈRE CARBONATE COTIER (MIOCÈNE DE L'ALGARVE – PORTUGAL)**

M. RAZACK<sup>1</sup>, C. DROGUE<sup>1</sup>, C. ROMARIZ<sup>2</sup> et C. ALMEIDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Laboratoire d'Hydrogéologie, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 34060 Montpellier Cdex (France)*

<sup>2</sup>*Centre de Géologie des Universités de Lisbonne, Lisbonne (Portugal)*

(Reçu le 5 février, 1979; révisé et accepté le 6 juin, 1979)

### **ABSTRACT**

Razack, M., Drogue, C., Romariz, C. et Almeida, C., 1980. Étude de l'effet de marée océanique sur un aquifère carbonate cotier (Miocène de l'Algarve — Portugal. (Ocean tide effect study on a coastal carbonate aquifer (Miocene of Algarve, Portugal).) *J. Hydrol.*, 45:57-69.

The study of groundwater-table variations due to ocean-tide effects in a coastal aquifer may yield, under certain conditions, its hydrodynamical characteristics.

Such a study has been attempted about a zone of the limestone aquifer of the Miocene of Algarve (Portugal).

Two computation methods can be utilized, depending on the form of the free-water table evolution: (1) a Carson—Laplace transform, or (2) adjustment of a sinusoidal variation law to the fluctuations.

Their application has permitted to characterize the aquifer's general hydrodynamical behaviour. The model that gives the most satisfying reconstitutions of the observations, particularly points out a seepage situation which fits quite well to the known geological conditions of the aquifer.

### **RÉSUMÉ**

L'étude des variations piézométriques d'un aquifère côtier, sous l'effet des marées océaniques, peut permettre, dans certaines conditions, d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

Ceci a été tenté sur un secteur des calcaires aquifères du Miocène de l'Algarve (Portugal).

Les deux méthodes de calcul utilisables, compte tenu de la forme de l'évolution du plan d'eau libre, ont été mises en application: (1) utilisation de la transformation de Carson—Laplace; et (2) ajustement d'une loi de variation sinusoidale aux fluctuations des niveaux.

Cette approche a permis de caractériser le comportement hydrodynamique général de l'aquifère. Le modèle donnant la reconstitution la plus satisfaisante des observations fait ressortir, notamment, un phénomène de drainance correspondant assez bien aux conditions géologiques connues de gisement de l'aquifère.

## INTRODUCTION

L'analyse des fluctuations du niveau piézométrique cyclique, dans un aquifère, sous l'effet des variations du niveau d'un plan d'eau libre avec lequel il est en relation, peut permettre, dans certaines conditions, d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

Ceci est notamment le cas lorsqu'un aquifère côtier est soumis à l'effet des marées océaniques.

Une étude expérimentale de ce phénomène a été abordée dans le Sud du Portugal (Algarve), dans un contexte particulier, puisque l'aquifère examiné est une série carbonatée fracturée, siège d'un karst moyennement développé. L'objectif est de reconnaître les possibilités d'identification des caractéristiques hydrodynamiques générales de l'aquifère à partir de l'analyse de cet effet de marée.

Cette note présente les premiers résultats significatifs.

## PROPAGATION D'ONDES PIÉZOMÉTRIQUES

A notre connaissance, c'est Boussinesq (1877) qui, le premier, proposa une formulation mathématique pour le déplacement d'ondes piézométriques dans une nappe en relation avec un plan d'eau libre.

Ce phénomène a été repris et développé par Ferris (1951).

Pour un aquifère captif semi-infini en relation avec un plan d'eau, l'équation de diffusivité hydraulique s'écrit:

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

avec  $S$  = coefficient d'emménagement (sans dimension);  $T$  = transmissivité ( $\text{m}^2/\text{hr.}$ ); et  $h$  charge (m).

La solution,  $h(x, t)$ , est fonction des conditions aux limites. La littérature spécialisée fournit deux approches différentes pour la résolution suivant que l'évolution dans le temps du plan d'eau, donc  $h(0,t)$ , peut être assimilée ou non à une loi sinusoidale. Rappelons très brièvement les deux types de solutions proposés.

### *Évolution sinusoidale*

Les conditions aux limites s'expriment par:

$$h(0,t) = h_0 \sin(2\pi t/t_0)$$

$$h(\infty,t) = 0$$

avec  $h_0$  = demi-amplitude; et  $t_0$  = période de fluctuation.

En faisant les hypothèses suivantes: (1) aquifère captif semi-infini communiquant sur toute sa hauteur avec le plan d'eau; (2) aquifère homogène et d'épaisseur constante; et (3) limite rectiligne entre plan d'eau et aquifère, la solution de l'équation de diffusivité est de la forme:

$$h(x, t) = h_0 e^{-X} \sin(\tau - X)$$

avec  $X = x/x_0$  = distance réduite;  $\tau = 2\pi t/t_0$  = temps réduit; et  $x_0 = (Tt_0/S\pi)^{1/2}$ . Cette solution indique que la surface piézométrique varie sinusoidalement avec un déphasage:  $\phi_B = t_0 X/2\pi$ .

De Cazenove (1971), dans une étude très détaillée, donne d'autres solutions, en considérant diverses hypothèses (aquifère limité, ou illimité, s'étendant ou non sous le plan d'eau), et en prenant notamment en compte le phénomène de drainance.

Dans le cas d'un aquifère semi-captif en communication directe avec le plan d'eau, l'équation de la diffusivité et sa solution sont de la forme suivante:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial X^2} - 2 \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{x_0^2}{B} h$$

avec  $\rho^2 - 1/\rho^2 = x_0^2/B^2$ ; et B = distance de drainance.

#### *Évolution de forme quelconque*

La résolution de l'équation fondamentale est obtenue, ici, par application du calcul opérationnel (double transformation de Carson-Laplace).

Pour les conditions aux limites suivantes (cas de l'échelon):

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

$$h(x, t) = h_0, \text{ pour } t \geq 0$$

on obtient:

$$h(x, t) = h_0 \operatorname{erfc} u$$

avec

$$u = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{Tt}} \quad \text{et} \quad \operatorname{erfc} u = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-x^2} dx$$

En substituant à la courbe d'évolution, un nombre d'échelons, défini suivant un certain pas de temps, et en appliquant le théorème de superposition, la solution élémentaire précédente peut aisément être étendue à tous les cas. La solution générale  $h(x, t)$  devient alors:

$$h(x, t) = h_0 \operatorname{erfc} u + \sum_i \Delta h_i \operatorname{erfc} u_i$$

avec

$$\Delta h_i = h_i - h_{i-1} \quad \text{et} \quad u_i = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{S}{T} \frac{1}{t - t_i}}$$

Ces méthodes sont appliquées par différents auteurs pour le calcul de S et T, en milieu fissuré: Garnier et Clarion (1967), ou en milieu poreux: Marino (1973), Peaudecerf (1973), Speelman and Ryckborst (1976) et Degallier (1978).

### AQUIFÈRE ÉTUDIÉ

Le littoral sud du Portugal (Algarve) est constitué, à l'Est, par des cordons littoraux sableux, et à l'Ouest, par une plate-forme de terrains secondaires et tertiaires qui se termine près de l'Océan par une falaise de quelques dizaines de mètres de hauteur.

Depuis Olhos de Agua, près du village de Albufeira, jusqu'à la ville de Lagos (Ponta de Piedade), soit sur près de 50 km, cette falaise s'est développée aux dépens d'un Miocène carbonaté, qui constitue l'aquifère objet du présent travail.

#### *Données géologiques (Fig. 1)*

La série calcaire miocène, d'une épaisseur maximale certainement voisine de 100 m, est tabulaire, avec un pendage de quelques degrés vers le Sud, donc vers l'Océan. Cette série repose en discordance angulaire sur les terrains secondaires (Jurassique et Crétacé) qui affleurent au Nord, eux-mêmes discordants sur le socle primaire.

La série géologique surmontant les terrains métamorphiques du primaire et les calcaires et dolomies du Jurassique est donc schématiquement constituée par les formations suivantes:

(1) Crétacé très épais formé de deux séries: un ensemble détritique (grès à ciment argileux, grès silicieux et argiles), et un complexe carbonate (calcaires compacts et marnes).

(2) Miocène calcaire. La description détaillée de cet étage est difficile par manque d'information précise sur les forages existants. La partie supérieure comprend des calcaires jaunes compacts, un peu cristallins, devenant gréseux au sommet, avec intercalations locales de lumachelles. Ces dépôts carbonates sont karstifiés.

La karstification profonde s'est probablement développée à la faveur d'une fracturation tectonique dès le Miocène supérieur et le Pliocène. En effet, des dépôts continentaux ferrugineux (grès, argiles, cailloutis), d'épaisseur pouvant atteindre 40 m, attribués au Plio-Quaternaire, fossilisent un paléo-karst.

Enfin, il faut signaler que d'anciennes plages marines quaternaires se rencontrent à différents niveaux classiques: le Tyrrhénien 1 (30—40 m), le Sicilien II (56-60 m) et le Sicilien I (80—100 m).

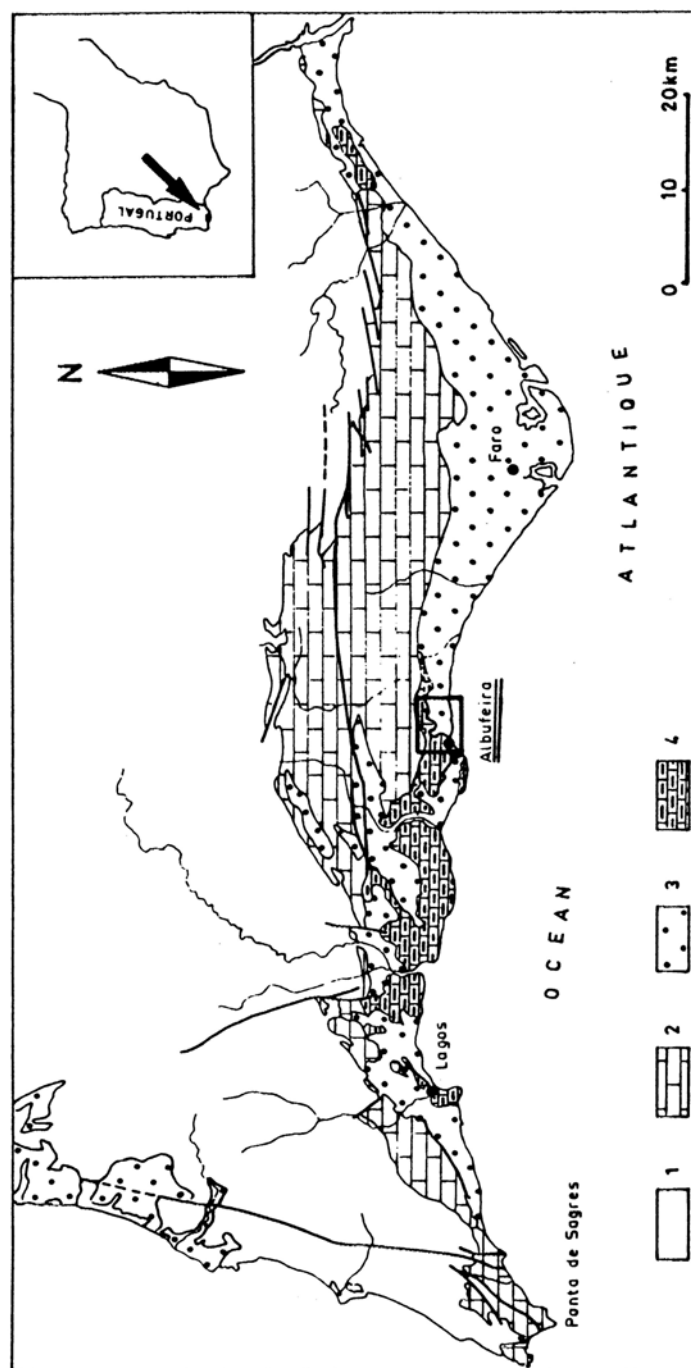


Fig. 1. Schéma géologique du Sud du Portugal (d'après la carte géologique du Portugal au 1/5000.000<sup>e</sup>).  
1 = socle primaire : imperméable (houiller) ; 2 = Jurassique : calcaires et dolomies perméables ; 3 = terrain à perméabilité moyenne à modérée (Crétacé, Plio-quaternaire et Quaternaire) ; et 4 = Miocène : calcaire

Fig. 1. Simplified geological map of southern Portugal (from the Geological Map of Portugal at scale 1/5000.000<sup>e</sup>).  
1 = primary socle : impermeable (coal-bearing) ; 2 = Jurassic : permeable limestones and dolomitic limestones ; 3 = terrain with a medium to moderate permeability (Cretaceous, Plio-Quaternary and Quaternary) ; and 4 = Miocene : limestones

En résumé, on retiendra qu'après les dépôts marins miocènes, le retrait de la mer, à une cote probablement inférieure à 50 m par rapport au niveau actuel, a dû favoriser le développement de la karstification dans les séries arbonatées, jusqu'à une cote inférieure au niveau actuel de l'Océan.

#### *Eaux souterraines*

L'étude géologique montre que les calcaires miocènes qui reposent, soit sur des terrains à perméabilité médiocre (Crétacé détritique), soit sur des niveaux perméables (Crétacé calcaire), sont surmontés par une couverture discontinue semi-perméable (Plio-quaternaire) et constituent ainsi un aquifère semi-captif (Fig.2).

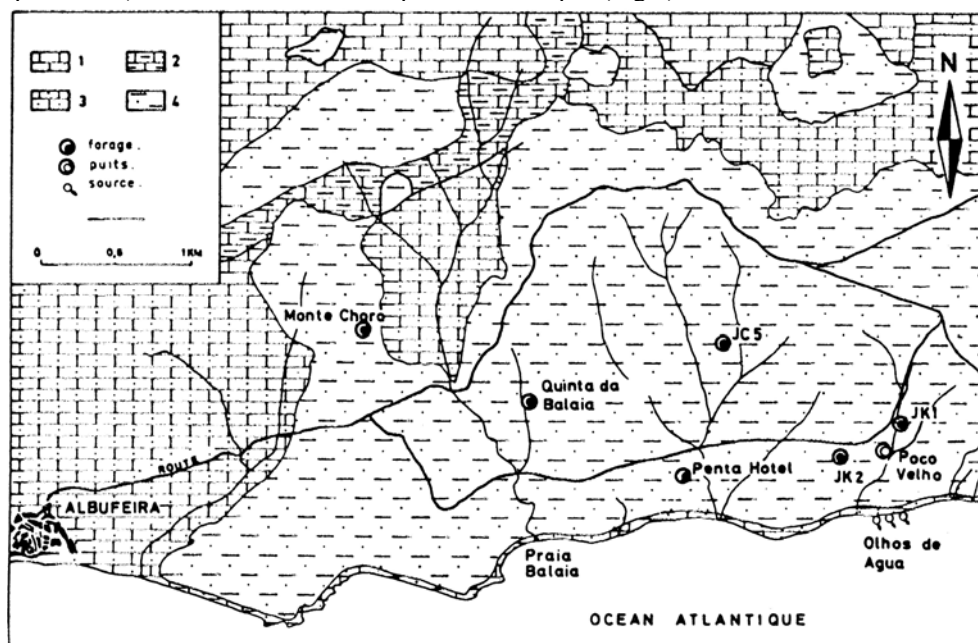


Fig. 2. Schéma géologique de la région de Olhos de Agua et de Albufeira, et situation des forages étudiés.

1 = série dolomitique du Jurassique supérieur (Portlandien) et série calcaire du Crétacé; 2 = série détritique et argileuse du Crétacé; 3 - série calcaire du Miocène (Helvétien); et 4 = série détritique continentale du Plio-Quaternaire et plages marines quaternaires.

Fig. 2. Geological map of the Olhos de Agua—Albufeira area, with location of the test boreholes.

1 = Upper Jurassic (Portlandian) dolomitic terrain and Cretaceous limestone terrain; 2 - Cretaceous sandy and clayey terrain; 3 = Miocene (Helvetian) limestone terrain; 4 - Plio-Quaternary continental sandy terrain and Quaternary seasides.

Les eaux du Miocène s'écoulent en mer par des sources côtières ou sousmarines, notamment dans le secteur étudié, près du village de Olhos de Agua, où un grand nombre de griffons apparaissent à marée basse, avec des débits ponctuels qui peuvent dépasser 20 l/s.

Le débit total de ces multiples sorties d'eau est totalement incontrôlable.

Les prélèvements sur cet aquifère sont importants, avec près de 100 forages exploités, dont certains à un débit supérieur à 100 m<sup>3</sup>/hr.

Compte tenu des facteurs suivants: superficie modeste de l'aquifère, situation littorale, et recharge vraisemblablement peu élevée (pluviométrie moyenne de 500 mm/an, recouvrement du Miocène par un faciès argileux), cette exploitation intensive devrait provoquer, semble-t-il, un déséquilibre entre l'eau souterraine et l'eau de mer, et l'invasion de la nappe par l'eau salée.

Le faible développement apparent de ce phénomène (tout au moins sur les points d'eau existants) pourrait être attribué à l'alimentation du Miocène par un autre aquifère voisin. Cet aquifère pourrait être les calcaires secondaires sur lesquels le Miocène repose directement en discordance.

#### *Conditions expérimentales*

Les points d'eau cités dans le texte (puits et forages), sont situés dans des zones où le Miocène est recouvert par le Plio-Quaternaire. Ds sont présentés dans le Tableau I.

Les valeurs des niveaux piézométriques sont, soit recueillies directement sur enregistreurs, soit relevées périodiquement. La précision de ces mesures est de l'ordre du centimètre.

Les fluctuations du niveau de l'Océan sont fournies par la table des marées de l'Institut Hydrographique Portugais. Nous avons procédé également à quelques relevés au droit de la zone étudiée.

Les données interprétées concernent la période du 1er au 9ème avril 1978.

TABLEAU I

Forages et puits étudiés

Désignation de l'ouvrage	Profondeur (m)	Distance à la côte (m)
Poço Velho	66	430
JK <sub>2</sub>	65	370
Penta Hotel	53	260
JC <sub>5</sub>	90	1.100
Quinta da Balaia	>80	880
Monte Choro	94	1.500



## RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET INTERPRÉTATION

Sur les six ouvrages retenus, quatre présentent des fluctuations piézométriques très nettes, attribuables à la marée océanique; il s'agit des forages de Monte Choro, Penta Hotel, JK<sub>2</sub> et Poço Velho. Les enregistrements de ces fluctuations sont d'une très bonne qualité.

Par contre, ce phénomène n'apparaît pas sur les deux forages Quinta da Balaia et JC<sub>5</sub>, qui sont cependant plus proches de la côte que le sondage de Monte Choro. Il pourrait s'agir là d'une conséquence de l'hétérogénéité de l'aquifère.

Pour l'interprétation des données, nous ferons l'hypothèse préliminaire qui consiste à admettre que le Miocène se comporte, du point de vue hydraulique, comme un milieu poreux. On peut estimer en effet, d'une part, que ce calcaire, qui est finement fissuré, constitue, à l'échelle considérée, un aquifère continu et que, d'autre part, les écoulements lents accompagnant les mécanismes en jeu peuvent être assimilés à des écoulements laminaires.

Les deux méthodes d'interprétation présentées au paragraphe "Propagation d'ondes piézométriques" seront utilisées pour l'analyse des phénomènes observés.

### *Application de la transformation de Carson—Laplace*

Un premier calcul est effectué avec la méthode utilisant la transformation de Carson—Laplace, afin d'examiner si l'hypothèse d'une nappe captive ne subissant aucune autre influence que celle de la marée pouvait être vérifiée.

Rappelons les hypothèses d'utilisation de cette méthode: (1) nappe captive; (2) diffusivité T/S, constante dans le temps et dans l'espace; (3) propagation linéaire de l'onde de pression; et (4) pas d'autre influence que celle de la marée.

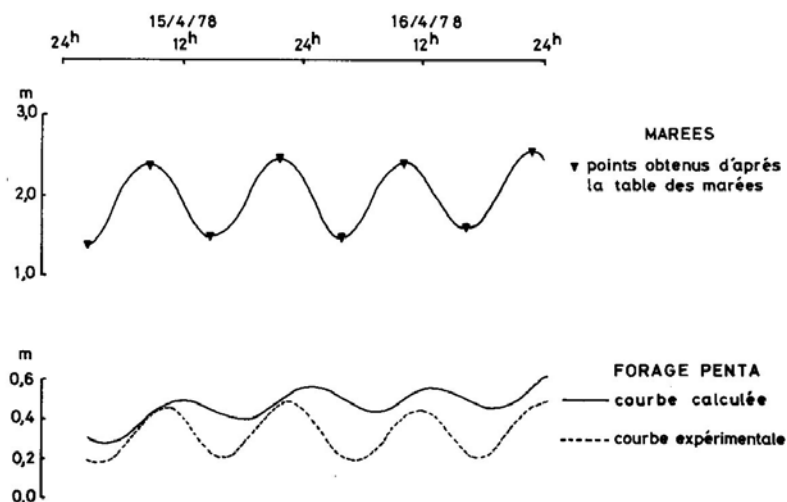


Fig. 3. Application de la transformation de Carson-Laplace à la reconstitution des fluctuations du forage Penta.

Fig. 3. Application of the Carson-Laplace transformation to the reconstitution of fluctuations at the Penta borehole.

Les calculs ont été effectués sur les données du piézomètre Penta (distance du rivage: 260 m) où la diffusivité  $D = 5070 \text{ m}^2/\text{hr}$ .

Les fluctuations piézométriques observées et calculées à l'aide de la valeur de  $T/S$  ci-dessus sont reportées sur la Fig. 3.

Il n'y a pas concordance entre les deux courbes, ce qui infirme donc l'hypothèse de l'influence unique de la marée.

Il convient donc d'envisager l'intervention d'autres facteurs, et notamment le phénomène de drainance, comme nous le verrons plus loin.

#### *Variation sinusoidale de la marée*

##### *Nappe captive: modèle Boussinesq*

La diffusivité  $D = T/S$  peut être calculée de deux façons:

(1) A partir de l'amortissement de l'amplitude:

$$e^{-X} = h/h_0 \quad \text{d'où} \quad X \text{ et } x_0$$

$$x_0 = \sqrt{\frac{t_0}{\pi}} D \quad \text{d'où} \quad D$$

(2) A partir du déphasage  $\phi$ :

$$\phi = \frac{t_0}{2\pi} \frac{x}{x_0} \quad \text{d'où} \quad x_0 \text{ et } D$$

TABLEAU II

Marée sinusoidale et nappe captive – Valeurs de la diffusivité calculées d'après le déphasage et l'amortissement

	Distance à la mer			
	260 m Penta	1.500 m Monte Choro	370 m JK <sub>2</sub>	430 m Poço Velho
½ amplitude, $h_{0,5}$ (cm)	13,0	7,5	16,5	12,5
Déphasage observés, $\phi$ (hr.)	1,50	3,20	1,50	0,50
<i>Diffusivité calculée d'après le déphasage :</i>				
$D$ ( $\text{m}^2/\text{hr.}$ )	30.603	223.811	61.975	753.369
$h$ (cm)	26,3	11,4	26,3	67,3
$\phi$ (hr.)	1,50	3,20	1,50	0,50
$x_0$ (m)	353,1	954,9	502,5	1.752,0
<i>Diffusivité calculée d'après l'amortissement :</i>				
$D$ ( $\text{m}^2/\text{hr.}$ )	7.975	139.168	23.182	12.201
$h$ (cm)	13,0	7,5	16,5	12,5
$\phi$ (hr.)	2,94	4,06	2,45	3,93
$x_0$ (m)	180,3	753,0	307,3	223,0

Les calculs ont porté sur les quatre piézomètres déjà cités. Les résultats sont donnés dans le Tableau II.

L'examen des résultats montre une différence très importante entre les valeurs de diffusivité calculées sur le même point à partir soit de l'amortissement, soit du déphasage. L'hypothèse d'une nappe parfaitement captive ne peut donc être retenue sur aucun des quatre points analysés.

#### *Nappe semi-captive (Fig. 4)*

Dans ce modèle, on envisage l'hypothèse de communications entre l'aquifère étudié et les terrains sus-jacents: c'est le schéma classique de la drainance.

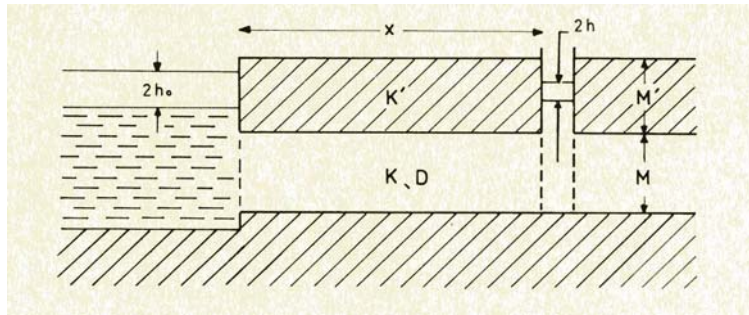


Fig. 4. Nappe semi-captive semi-infinie.

$h_0$  = demi-amplitude de la marée;  $h$  = demi-amplitude observée sur forage;  $x$  = distance à la mer;  $D$  = diffusivité;  $K, K'$  = perméabilité; et  $M, M'$  = épaisseur.

Fig. 4. Semi-confined and semi-infinite groundwater.

$h_0$  = half-amplitude of the tide;  $h$  = half-amplitude observed at borehole;  $x$  = distance to the seaside;  $D$  = diffusivity;  $K, K'$  = hydraulic conductivity; and  $M, M'$  = thickness.

Dans les calculs intervient donc la grandeur caractéristique  $B$  ( $B = \sqrt{MM'K/K'}$ , distance de drainance).

D'après de Cazenove (1971), la valeur de  $B$  est liée à un paramètre  $\rho$  différent de zéro, caractérisant l'intensité de la drainance, par:

$$\rho^2 - 1 / \rho^2 = x_0^2 / B^2$$

et la formule du modèle de Boussinesq devient dans ce cas:

$$h(x, t) = h_0 e^{-\rho x / x_0} \sin (2\pi t / t_0 - x / x_0 \rho)$$

Les valeurs observées de l'amortissement et du déphasage permettent de déduire  $x_0/\rho$  d'une part, et  $x_0\rho$  d'autre part, d'où  $x_0, \rho$  et  $B$ .

La valeur de la diffusivité en découle aisément.

Ces calculs ont été appliqués aux quatre piézomètres. Les résultats sont reportés dans le Tableau III.

A partir des valeurs de  $\rho$ , il apparaît que l'effet de drainance est considérable au niveau de Poço Velho ( $\rho = 2,8029$ ). Sur Penta ( $\rho = 1,3996$ ) et sur JK<sub>2</sub> ( $\rho = 1,2784$ ) cet effet devient moins important. Remarquons que pour  $\rho = 1,2784$  on a pratiquement  $B \cong x_0$  ; les ondes sont en conséquence peu modifiées. A Monte Choro  $\rho$  est voisin de 1 ( $\rho = 1,1261$ ) ; l'influence de la drainance est donc très atténuée.

TABLEU III

Marée sinusoidale et nappe semi-captive – Valeurs de la diffusivité et des autres grandeurs caractérisant la drainance

Piézomètre	Penta	Monte Choro	JK <sub>2</sub>	Poço Velho
$\rho$	1,3996	1,1261	1,2784	2,8029
$x_0$ (m)	252,3	848,0	392,8	625,1
$B$ (m)	209,6	1.224,4	388,6	224,8
$B/x_0$	0,8321	1,444	0,989	0,359
$D$ (m <sup>2</sup> /hr.)	15.650	176.500	37.800	95800
$h$ (cm)	13,00	7,50	16,50	12,500
$\phi$ (hr.)	1,50	3,20	1,50	0,50

La compatibilité des valeurs calculées de l'amortissement et du déphasage avec introduction de la drainance, et des valeurs observées, incite en conséquence à retenir le schéma d'un aquifère semi-infini, semi-captif, communiquant directement avec la mer.

A titre d'exemple, on trouvera sur la Fig. 5 la reconstitution des fluctuations sur le piézomètre Penta pour différentes hypothèses.

Il faut relever enfin que la diffusivité serait beaucoup plus faible dans la partie est du secteur étudié ( $15.000 \text{ m}^2/\text{hr.} < D < 100.000 \text{ m}^2/\text{hr.}$ ) que dans la partie ouest représentée par le forage de Monte Choro ( $D \cong 200.000 \text{ m}^2/\text{hr.}$ ). A l'Est, la faible diffusivité est conforme à l'absence de marée sur les forages de Quinta da Balaia et JC<sub>5</sub>.

Enfin une dernière remarque pour signaler qu'un calcul de diffusivité a été effectué sur un forage voisin (forage JK<sub>1</sub>,  $D = 21.000 \text{ m}^2/\text{hr.}$ ) à l'aide d'un essai par pompage. Cette valeur se situe bien dans la fourchette caractérisant la partie est du secteur étudié.

## CONCLUSION

Le modèle qui permet la reconstitution la plus satisfaisante des marées observées sur certains forages et puits correspond assez bien aux conditions géologiques connues: nappe semi-captive du fait d'un recouvrement plio-quatenaire sablo-argileux et discontinu, nappe semi-infinie liée à la faible extension vers le Nord du dépôt miocène.

Si certains points mériteraient d'être précisés (notamment la réalité et l'importance de la drainance), cette étude permet cependant de situer les caractéristiques hydrauliques générales de certains secteurs de l'aquifère et de mettre en évidence son hétérogénéité à grande échelle.

Ces résultats, acquis au prix d'une investigation technique très brève, fournissent donc un canevas de travail utile pour la suite des études de cette nappe.

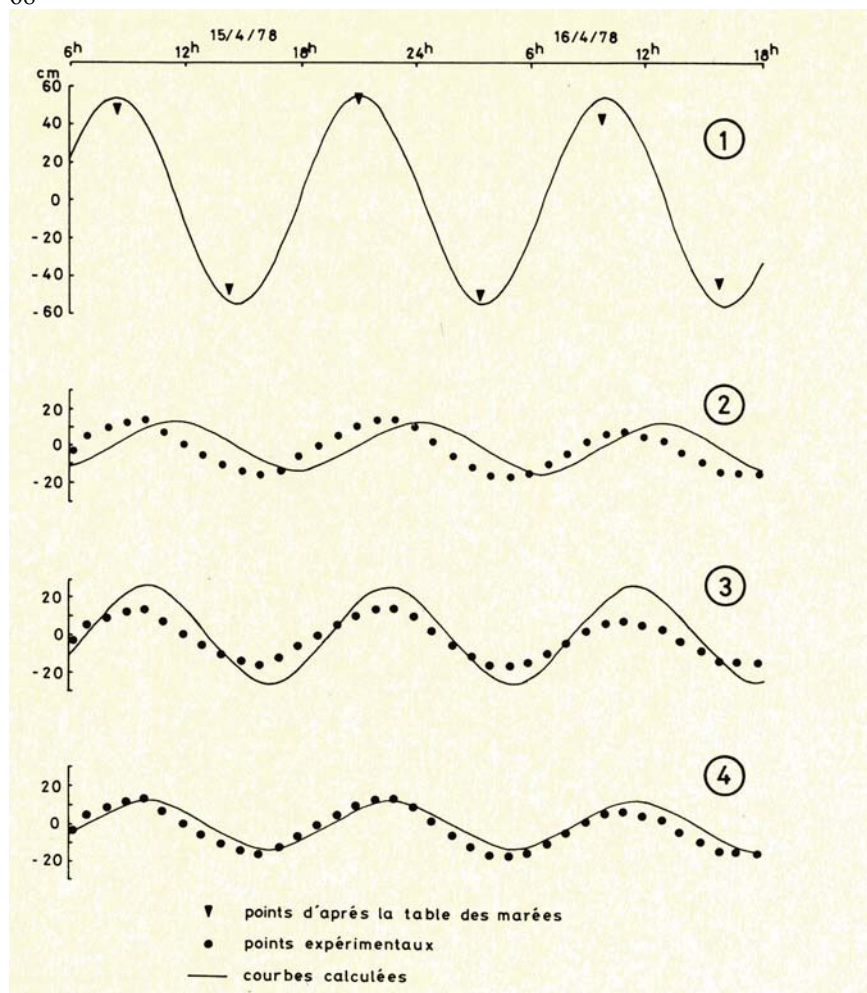


Fig. 5. Reconstitution des fluctuations au forage Penta suivant diverses hypothèses : 1 = marée côtière (sinusoïde équivalente) ; 2 = nappe captive ;  $D = 7.975 \text{ m}^2/\text{hr.}$ , évaluée d'après l'amortissement ; 3 = nappe captive ;  $D = 30.603 \text{ m}^2/\text{hr.}$ , évaluée d'après le déphasage ; et 4 = nappe semi-captive :  $D = 15.650 \text{ m}^2/\text{hr.}$

Fig. 5. Reconstitution of the fluctuations at the Penta borehole, after the following assumptions :

1 = costal tide (equivalent sinusoïde); 2 = confined groundwater;  $D = 7.975 \text{ m}^2/\text{hr.}$ , computed from damping of waves; 3 = confined groundwater;  $D = 30.603 \text{ m}^2/\text{hr.}$ , computed from time lag ; and 4 = semi-confined groundwater:  $D = 15.650 \text{ m}^2/\text{hr.}$

#### BIBLIOGRAPHIE

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 sinusoidales. *Houille Blanche*, 26: 601-616.
- Degallier, R., 1978. Propagation de fluctuations périodiques dans une nappe semi-captive non illimitée - Application à la nappe de Moulineaux (Rouen). *Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, Rapp. 78 SGN 319 HYD.*
- Ferris, J., 1951. Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. *Assoc. Int. Hydrol. Sci., Assem. Gén., Gen. Bruxelles, t. II*, 148 pp.
- Garnier, J. C. et Clarion, C. L., 1967. Transmission des ondes de crue du Verdon à travers le massif d'appui rive droit du futur barrage de Sainte-Croix. *Houille Blanche*, 22: 61-71.
- Marino, M. A., 1973. Water-table fluctuation in semi-pervious stream-unconfmed aquifer systems. *J. Hydrol.*, 19 :43-52.
- Peaudecerf, P., 1973. Relations entre une nappe alluviale et un cours d'eau de surface – Les programmes HYGP1-HYGP2. *Bull. Bur. Rech. Géol. Min., 2ème Sér., Sect. III, No. 2*, pp. 77-85.
- Speelman, H. et Ryckborst, H., 1976. Hydrogeology of the Quaternary and Tertiary formations along the south coast of the Algarve, Portugal. *Hydrol. Sci. Bull.*, 21(2-6): 345-356.