



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 999–1006



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Modélisation physique de l'intrusion d'eau de mer dans un aquifère karstique : cas de l'Almyros d'Héraklion (Crète)

Bruno Arfib^{a,*}, Jacques Ganoulis^b

^a *Laboratoire de chimie et environnement, université de Provence, case 29, 3 place Victor-Hugo, 13331 Marseille cedex 3, France*

^b *Laboratoire d'hydraulique, École technique, université Aristote de Thessalonique, 54006 Thessalonique, Grèce*

Reçu le 1^{er} mars 2004 ; accepté le 9 mars 2004

Disponible sur Internet le 10 juin 2004

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Les aquifères côtiers sont soumis à l'intrusion naturelle de l'eau de mer vers le continent. Des expériences sont réalisées au laboratoire à l'aide d'une maquette modélisant les conditions hydrauliques d'entrée d'eau salée à travers les parois d'un conduit karstique poreux, dans lequel circule initialement de l'eau douce. Ce schéma s'apparente au fonctionnement du système karstique côtier de l'Almyros d'Héraklion (Crète). Ces expériences montrent que l'intrusion d'eau de mer dans un conduit karstique peut être diffuse, ne conduit pas nécessairement à une ségrégation densitaire et n'a pas nécessairement lieu par un réseau de conduits en connexion directe avec la mer. *Pour citer cet article : B. Arfib, J. Ganoulis, C. R. Geoscience 336 (2004).* © 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Physical modelling of the seawater intrusion within a karst aquifer: the case of the Almyros of Heraklion (Crete). Coastal aquifers are subjected to natural seawater intrusion. Laboratory experiments were made to model the hydraulic conditions of saltwater inflow into a porous karstic conduit through which the freshwater flows. The conceptual model is based on the functioning scheme of the coastal karst system Almyros of Heraklion, Crete. The experiments show that seawater intrusion in a karst conduit can be diffuse, does not always lead to density separation of freshwater and seawater, and is not necessarily related to a conduit-network directly connected to the sea. *To cite this article: B. Arfib, J. Ganoulis, C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : maquette ; modèle ; karst ; conduit ; intrusion saline ; source ; Almyros ; Crète

Keywords : physical model ; karst ; conduit ; saline intrusion ; spring ; Almyros ; Crete

Abridged English version

1. Introduction

Numerical modelling of flow and transport in a karst aquifer is difficult because of the spatial hetero-

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : bruno.arfib@up.univ-mrs.fr (B. Arfib).

generality of this kind of aquifers. Physical modelling is a complementary method used to test and validate simplifying assumptions.

Within the framework of the study of the coastal karst system Almyros of Heraklion (northern Crete), a physical model of the conceptual model of the studied aquifer was built prior to the development of a numerical code. The main goal was to explore the physical possibility of a mechanism of diffuse seawater intrusion into the karstic conduit that supplies the Almyros spring (Fig. 1), as proposed by [1,2]. Moreover, the model was used to observe the flow exchange between the conduit where the freshwater flows and its surrounding calcareous matrix filled with seawater (the saltwater tank in the experiments).

2. Material and method

Each experiment consists in generating a freshwater flow through a Plexiglas conduit with drilled holes, a prescribed head at the entrance and the outlet of the conduit, and a constant head of saltwater above the conduit with the same density than that of the Sea of Crete.

The similarity condition is satisfied by equal Reynolds numbers [5] for the real flow and the physical model flow (above 5×10^3 , turbulent flow). The physical model (Figs. 2 and 3) consists of two tanks connected by a circular plastic conduit (length: 395 cm) that crosses a tank filled with saltwater (250 l). The conduit has a 1-m-long zone of transparent Plexiglas tube with drilled holes (diameter: 3 mm) through which exchanges occur between the freshwater circulating through the conduit and the saltwater of the tank. In some cases, the conduit is surrounded by sand.

The measured parameters are: (a) the water salinity at the outlet of the model, (b) the total discharge rate at the outlet of the model, (c) the equivalent column of freshwater head at the entrance (H_e in Fig. 2) and at the outlet (H_f in Fig. 2) of the Plexiglas tube, (d) the equivalent freshwater column above the conduit in the saltwater tank.

3. Studied cases

Freshwater–saltwater exchanges occur through the Plexiglas tube at several locations of the holes (Fig. 4).

Two cases are studied: (1) the Plexiglas tube is immersed into the transparent saltwater tank. The flow direction is visible as well as the mixing processes; (2) the Plexiglas tube is surrounded by a heterogeneous sand layer in the saltwater tank to simulate a karst conduit crossing an equivalent porous medium (by simplification, the karst matrix).

4. Results

The brackish Almyros of Heraklion spring has the particularity that it discharges 3 m above sea level. The physical model simulates this case, with a water level at the outlet of the porous conduit, measured by H_f at the end of the Plexiglas tube (Fig. 2), above the level of the saltwater in the tank, measured by H_m . By performing experiments where the head increases with time at the entrance of the conduit, simulating a rain event and a flood in the karstic system, we show that the inflow of saltwater into the conduit decreases with time (Fig. 5 from the time 210 s).

The observation of the flow through the transparent Plexiglas tube shows two cases depending on the location of the holes:

(1) The holes are located at the top or the bottom of the tube (Fig. 4A and B). The freshwater is expelled from the conduit through the first holes crossed in the flow direction (Fig. 6). The head inside the conduit decreases in the flow direction with the loss of freshwater and the friction against the wall of the conduit (Fig. 6), and saltwater starts to flow into the conduit. The fresh and salt waters mix instantaneously.

(2) The holes are located all around the tube (Fig. 4C). The saltwater flows in at the bottom of the conduit and creates a wedge of saltwater (Fig. 7). Fresh and salt waters do not mix instantaneously, and there is a stratified turbulent flow that seems to be more rapid in the upper part of the conduit where the freshwater flows. The stratification stops after the zone of drilled holes and the two fluids mix in a turbulent movement.

5. Conclusion

An increased head (and freshwater flow rate) at the entrance of the hydrogeological system or of the physical model produces a decrease in the saltwater inflow in the conduit, together with a dilution effect

(increased flow). The experiments with the physical model show the physical possibility of a diffuse saline intrusion in a karst conduit crossing a zone of the coastal aquifer invaded by seawater. The results confirm that the salinity of a sub-marine karstic spring, when seawater intrusion occurs, has its origin in three potential phenomena, coupled or uncoupled [2–4,7]: (i) direct entrance of seawater at the mouth of the submarine spring as observed in estuaries, (ii) seawater entrance by a secondary conduit connected directly to the sea at depth, (iii) diffuse seawater inflow into the karstic gallery supplying the spring as described here.

1. Introduction

La modélisation numérique de l'écoulement et du transport dans un aquifère karstique est une tâche difficile à mettre en œuvre du fait de l'hétérogénéité spatiale de ce type d'aquifère. La modélisation physique sur maquette est un outil complémentaire qui permet de tester et de valider certaines hypothèses simplificatrices.

Dans le cadre de l'étude du système karstique côtier de l'Almyros d'Héraklion (Crète du Nord), une maquette du modèle conceptuel de l'aquifère étudié a été construite préalablement au développement d'un modèle numérique. L'objectif majeur est de vérifier que le mécanisme d'intrusion diffuse d'eau de mer puis de mélange sans ségrégation densitaire dans le conduit karstique alimentant la source Almyros, tel qu'il a été proposé par [1,2], est physiquement possible. Il s'agit par ailleurs d'observer visuellement les échanges d'eau douce et d'eau salée entre le conduit et sa matrice calcaire environnante (ici le bassin d'eau salée).

Le système karstique de l'Almyros d'Héraklion est caractérisé par une unique source exutoire aérienne, à la salinité très variable. L'eau de la source est douce en hiver durant les fortes crues, mais elle contient une forte proportion d'eau de mer inversement proportionnelle au débit le restant de l'année. Le mécanisme de salinisation proposé par [1,2] est basé sur la dualité de l'écoulement dans le karst et sur le phénomène naturel d'intrusion saline dans les aquifères côtiers. L'eau douce souterraine circule préférentiellement dans un conduit karstique majeur jusqu'à la source. Durant son trajet, elle traverse une zone de l'aquifère envahie par

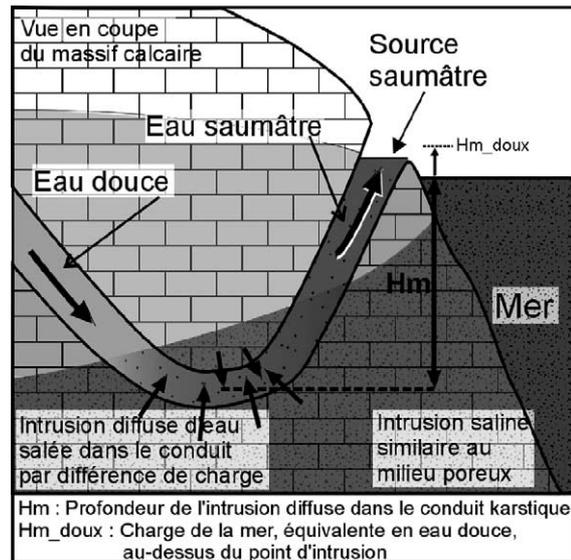


Fig. 1. Coupe schématique illustrant le mécanisme d'intrusion saline diffuse dans un conduit karstique alimentant une source saumâtre aérienne côtière.

Fig. 1. Sketch of the diffuse saline intrusion mechanism into a karst conduit supplying an aerial coastal brackish spring.

l'eau de mer. En fonction des charges hydrauliques à l'intérieur du conduit et à l'extérieur (dans la matrice calcaire assimilée à un milieu poreux pour la modélisation), une certaine quantité d'eau de mer peut ainsi entrer dans le conduit et se mélanger à l'eau douce (Fig. 1).

La maquette permet de simuler l'intrusion d'eau salée à travers les parois d'un conduit poreux dans lequel circule initialement de l'eau douce. Nous n'avons pas testé le cas de l'entrée directe d'eau de mer dans le conduit par une galerie sous-marine annexée connectée à la mer, souvent présenté comme l'unique explication de la salinisation de la source, car il est bien connu [3]. Les résultats sont présentés en fonction de la charge en eau douce appliquée à l'entrée et des caractéristiques du conduit (diamètre, porosité, longueur). Ces combinaisons de variables ont donné lieu à la réalisation de 50 séries de mesures, qui permettent d'établir la pertinence du mécanisme proposé.

2. Matériels et méthode

La maquette a été construite au laboratoire d'hydraulique et d'environnement de l'université de Thes-

salonique (Grèce), au sein du laboratoire d'expérimentation. Chaque expérience consiste à générer un écoulement d'eau douce, avec une charge imposée en entrée et en sortie, à travers un tube de plexiglas percé de trous, entouré éventuellement de sable, surmonté d'une hauteur constante d'eau salée de densité égale à celle de la mer de Crète (1027 kg m^{-3}).

2.1. Conditions de similitude et échelle

La condition de similitude correspond à la condition de Reynolds, c'est-à-dire à l'égalité des nombres de Reynolds entre l'écoulement réel et l'écoulement en maquette [5]. Le nombre de Reynolds (\Re_e) est exprimé par la formule suivante :

$\Re_e = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$ où V est la vitesse moyenne du fluide, D le diamètre de la conduite, μ la viscosité dynamique, ρ la densité du fluide, $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique.

L'écoulement en charge dans les conduits karstiques est reconnu pour être turbulent, avec un nombre de Reynolds supérieur à 5×10^3 . L'écoulement dans la conduite en plastique de la maquette a donc été forcé par des charges imposées en entrée et sortie engendrant une vitesse d'écoulement de l'ordre de $0,2 \text{ m s}^{-1}$, pour obtenir un nombre de Reynolds compris entre $0,5 \times 10^4$ et 1×10^4 . Des vitesses plus rapides générant de plus grands nombres de Reynolds n'ont pas pu être testées.

L'échelle est définie comme le rapport des grandeurs réelles sur celles de la maquette. Du fait du manque de données sur le système de l'Almyros d'Héraklion en profondeur, les dimensions de la maquette ne sont pas directement utilisables pour tirer des conclusions quantitatives à partir des résultats obtenus par l'expérimentation. Toutefois, les résultats sont qualitativement représentatifs des phénomènes physiques testés.

2.2. Configuration de la maquette

Les Figs. 2 et 3 illustrent la maquette construite. La maquette est composée de deux réservoirs reliés entre eux par une conduite circulaire en plastique (395 cm de longueur) qui traverse un bassin rempli d'eau salée. Cette conduite comporte une zone d'un mètre de tube plexiglas transparent horizontal percé de trous de 3 mm de diamètre, par lesquels se font les échanges entre l'eau douce circulant initialement dans le conduit et l'eau salée du bassin. Le bassin, d'un volume de 250 l, est long et étroit (252 cm sur 16 cm, et hauteur 76 cm). Le tube de plexiglas est posé à 6 cm au-dessus du fond du bassin, et est recouvert d'environ 60 cm d'eau salée. La rugosité de la conduite n'a pas été mesurée.

La porosité du tube percé de trous est estimée par la porosité de surface ω_s , calculée avec un diamètre

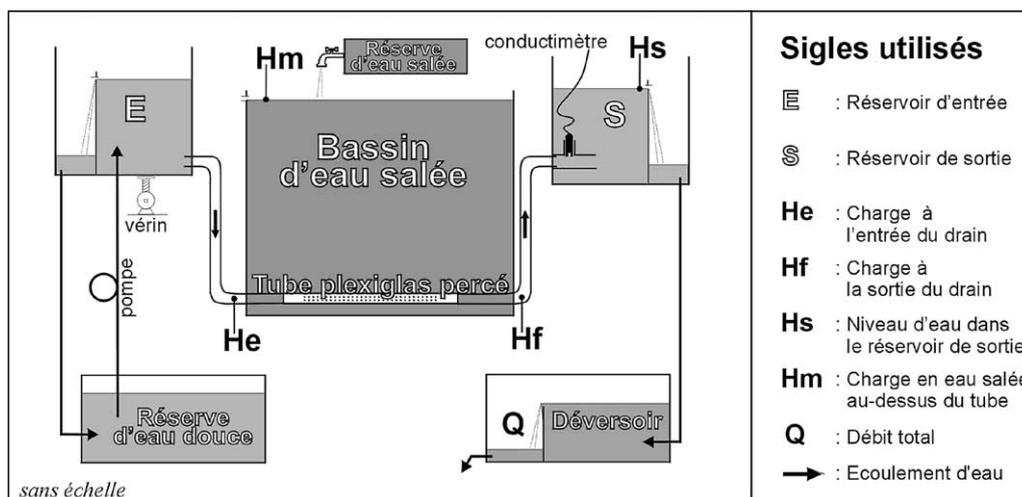


Fig. 2. Schéma de la maquette utilisée.

Fig. 2. Sketch of the physical model.

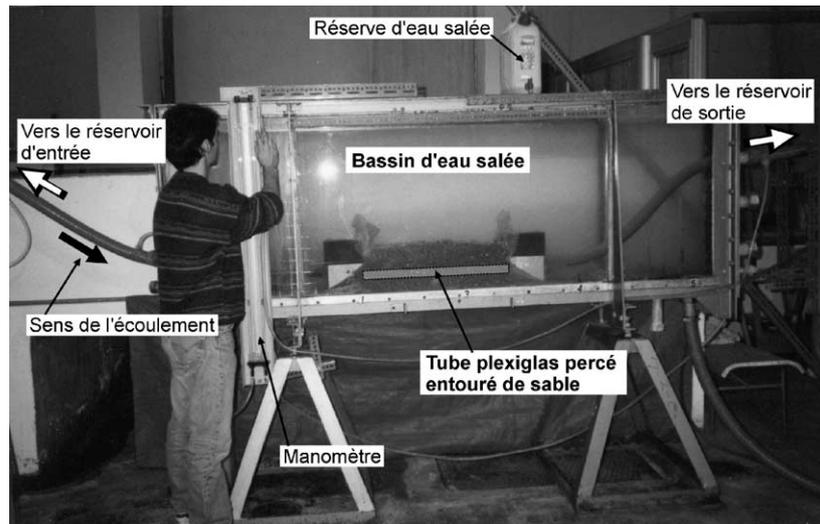


Fig. 3. Photo de la maquette : bassin d'eau salée contenant le tube plexiglas percé de trous.

Fig. 3. Picture of the model: tank filled with salt-water crossed by the Plexiglas conduit.

moyen du tube D_T de 4,8 cm, suivant la relation [6] :

$$\begin{aligned} \text{porosité de surface } \omega_s &= \frac{\text{surface des vides}}{\text{surface totale}} \\ &= \frac{\pi R_p^2 N}{\pi D_T L} = \frac{R_p^2 N}{D_T L} \end{aligned}$$

avec R_p le rayon moyen des trous dans le tube (équivalent à des pores), N le nombre de trous, D_T le diamètre du tube en plexiglas, L la longueur du tube comportant des trous.

2.3. Mesures

L'eau salée dans le bassin simule l'eau de mer avec une densité moyenne de 1027 kg m^{-3} . Elle est obtenue par mélange d'eau douce avec du sel de mer alimentaire non traité (NaCl).

Au cours des expériences, l'évolution de la salinité de l'eau à la sortie du conduit est mesurée et enregistrée automatiquement, à un pas de temps de 5 s, à l'aide d'un thermo-conductimètre WTW. Les valeurs de charge à l'entrée (H_e) et à la sortie (H_f) du tube en plexiglas sont obtenues en hauteur de colonne d'eau douce grâce à deux tubes piézométriques remplis d'eau douce, implantés dans la conduite et connectés à un manomètre (Fig. 3). Leur emplacement de part et d'autre du drain permet de connaître les charges dans le système en s'affranchissant des fortes pertes de

charge locales, à la jonction avec les réservoirs d'entrée et de sortie. La hauteur d'eau salée dans le bassin au dessus du drain (H_m) est mesurée directement sur la vitre du bassin. Elle est transformée en hauteur d'une colonne d'eau douce équivalente au-dessus du drain (H_{m_doux}) par la relation :

$$\begin{aligned} H_{m_doux} &= H_m \times \frac{\rho_{\text{eau salée}}}{\rho_{\text{eau douce}}} \\ &= H_m \times d_{\text{eau salée}} \quad \text{avec } d_{\text{eau salée}} = 1,027 \end{aligned}$$

avec $\rho_{\text{eau salée}}$ la masse volumique de l'eau salée, $\rho_{\text{eau douce}}$ la masse volumique de l'eau douce, $d_{\text{eau salée}}$ la densité de l'eau salée.

La précision des mesures visuelles est de l'ordre de 0,5 mm pour les hauteurs, et 1 l min^{-1} pour le débit.

3. Les situations testées

3.1. Cas d'un conduit « poreux » traversant un bassin d'eau salée

Le conduit « poreux » est représenté par le tube de plexiglas transparent percé de trous et immergé dans le bassin contenant de l'eau salée. Ce dispositif ne constitue pas une représentation exacte du fonctionnement de l'aquifère étudié, car la capacité d'échange de l'eau à travers les pores du drain n'est alors limitée

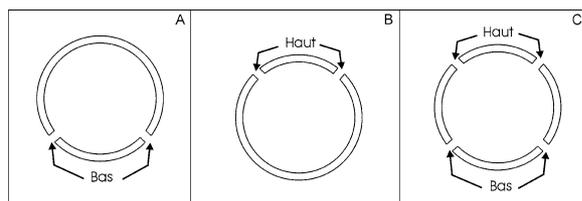


Fig. 4. Coupe transversale du tube de plexiglas percé de trous, montrant la position des trous en bas (A), en haut (B), en haut et en bas (C).

Fig. 4. Cross-section of the Plexiglas conduit, showing the location of the drilled holes in the lower part (A), in the upper part (B), in the upper and lower part (C).

que par leur diamètre et non pas par la perméabilité de la matrice calcaire autour du drain. Toutefois, ces expérimentations sont indispensables, car elles permettent de visualiser directement les flux d'eau douce et d'eau salée, le sens de circulation des deux fluides et leur mélange (ou non) dans le tube.

Différentes porosités de surface (de 3,6 à 7,7 %) variant avec le nombre de trous, et différentes positions des trous ont été testées (les positions en haut et en bas sont illustrées par la Fig. 4).

3.2. Cas d'un conduit poreux traversant un milieu poreux contenant de l'eau salée

Le tube percé de trous est dans ce cas surmonté par 10 cm de sable hétérogène dans le bassin d'eau salée (Fig. 3). La granulométrie de ce sable varie de 0,1 à 10 mm. Ce dispositif représente un conduit traversant un aquifère poreux. Il s'apparente au milieu karstique réel décrit comme un réseau de conduits au sein d'une matrice continue équivalente à un milieu poreux (simplification nécessaire pour la modélisation). L'observation directe des flux d'eau de mer et d'eau salée n'est alors plus possible. Différentes porosités de surface du tube (de 3,8 à 16,6 %), variant avec le nombre de trous, et différentes positions des trous ont été testées.

4. Résultats et discussions

Les résultats présentés ont été obtenus dans le cas où le niveau d'eau à la sortie du conduit poreux, ici mesuré au point H_f à la sortie du tube de plexiglas (Fig. 2), est toujours supérieur au niveau d'eau de mer, représenté par le niveau H_m du bassin d'eau

salée. Cette situation s'apparente à la position de la source Almyros d'Héraklion, d'où sort de l'eau saumâtre 3 m au moins au-dessus du niveau de la mer. L'eau douce et l'eau salée des expériences ont une température proche de 18 °C. La conductivité électrique, équivalente à la salinité, est initialement égale à 753 $\mu\text{S cm}^{-1}$ pour l'eau douce et à 60 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ pour l'eau salée. À la sortie de la maquette, la conductivité électrique varie de 753 à 25 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, suivant les expériences.

4.1. Evolution du flux de sel lors de la variation de charge à l'entrée

Une série d'expériences consistant à faire varier au cours du temps la charge à l'entrée de la maquette a été réalisée, avec différentes configurations du tube poreux. Le flux de sel dans le conduit, exprimé en débit d'eau salée, permet de s'affranchir des effets de dilution. La Fig. 5 illustre d'une manière qualitative le résultat obtenu. Elle montre les variations de salinité et de débit d'eau salée, indépendamment des valeurs de la porosité du tube et de H_e . Le niveau du réservoir d'entrée (E) est surélevé de 7 cm (Fig. 5) entre les temps 210 et 270 s, conduisant ensuite à la stabilisation du débit total et de la salinité à la sortie. L'augmentation de la charge à l'entrée du drain, qui serait due dans le milieu naturel à un événement pluvieux, puis à la propagation d'une onde de crue, provoque une forte diminution du débit d'eau salée entrant dans le conduit (Fig. 5 à partir du temps 210 s).

Lorsque l'augmentation de charge à l'entrée est plus forte, l'eau peut être totalement douce à la sortie, mais un fort débit d'eau douce s'échappe alors du conduit vers le bassin d'eau salée dans le cas des expériences avec le tube poreux directement immergé dans le bassin. Les expériences réalisées avec du sable autour du tube percé de trous montrent que les phénomènes enregistrés à la sortie sont similaires à ceux observés sans sable, mais la perte d'eau douce vers la matrice est alors plus faible.

4.2. Distribution spatiale des échanges conduit-matrice lors d'une charge constante en entrée

La maquette permet d'observer visuellement le sens de l'écoulement au niveau des trous dans le

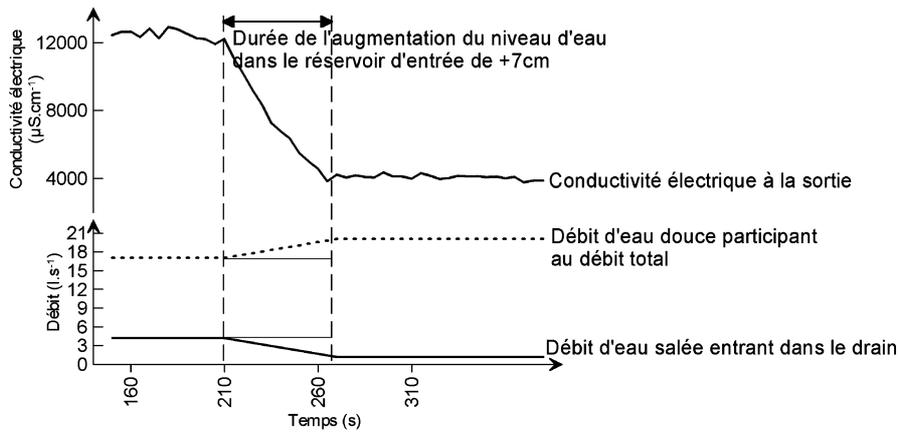


Fig. 5. Salinité et débits au cours du temps lors d'une augmentation de charge à l'entrée de la maquette.

Fig. 5. Temporal evolution of the salinity and discharge for an increase in the hydraulic head at the entrance of the model.

tube de plexiglas (cas d'expériences sans sable), du conduit vers le bassin ou du bassin vers le conduit (équivalent aux échanges conduit–matrice dans le milieu naturel). La différence de réflectivité des deux fluides de densités différentes permet en effet de les discerner à l'œil nu sans coloration artificielle. Les charges sont constantes en entrée et sortie de la maquette et dans le bassin d'eau salée.

4.2.1. Cas d'un tube percé de trous en position basse ou en position haute

Les expériences menées avec les trous en position basse (Fig. 4A), et celles menées avec les trous en position haute (Fig. 4B) donnent des résultats très proches. L'eau douce est expulsée du conduit par les premiers trous rencontrés dans le sens de l'écoulement (Fig. 6), lorsque la hauteur d'eau douce H_e est plus forte que la hauteur d'eau douce équivalente du bassin d'eau salée H_{m_doux} (correction par la densité de l'eau salée). La charge dans le conduit diminue dans le sens de l'écoulement avec la perte d'eau douce et le frottement sur les parois. L'eau salée entre alors dans le conduit (Fig. 6), à un débit et à partir d'une zone variables en fonction de la charge en eau douce dans le réservoir d'entrée de la maquette. Le mélange entre l'eau douce et l'eau salée est instantané, sans aucune ségrégation densitaire.

4.2.2. Cas d'un tube percé de trous en haut et en bas

Les phénomènes sont différents avec le tube percé de trous en haut et en bas (Fig. 4C) : l'eau salée rentre

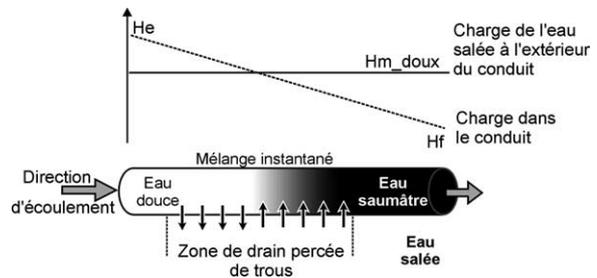


Fig. 6. Représentation schématique des échanges conduit–matrice lorsque le tube de plexiglas est percé de trous en position basse (même principe en position haute).

Fig. 6. Sketch of the conduit–matrix exchanges with a Plexiglas conduit with drilled holes in the lower position (same results are obtained with drilled holes in the upper position).

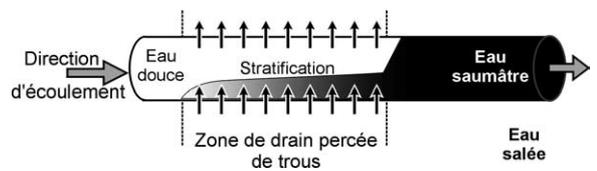


Fig. 7. Représentation schématique des échanges conduit–matrice et de la stratification de l'écoulement lorsque le tube de plexiglas est percé de trous en positions haute et basse.

Fig. 7. Sketch of the conduit–matrix exchanges and of the flow stratification with a Plexiglas conduit with drilled holes in the upper and lower positions.

préférentiellement par le bas du conduit et forme une « langue » d'eau salée au fond du tube (Fig. 7). L'eau douce et l'eau salée ne se mélangent plus

instantanément, et un écoulement stratifié turbulent se met en place, avec un écoulement visiblement plus rapide dans la partie haute du tube, où circule l'eau douce (aucune mesure de vitesse n'a pu être faite), et plus lent dans la partie basse salée. Après la zone percée de trous, la stratification cesse rapidement et les deux fluides se mélangent dans un mouvement turbulent. Ce phénomène de stratification densitaire est d'autant plus important que la charge d'eau douce à l'entrée du tube poreux est faible.

L'existence d'une stratification dépend du gradient de densité et est décrite par le signe du nombre de Richardson [8]. Lorsque le fluide le plus dense se trouve sous le fluide le moins dense, le nombre de Richardson est positif et indique une stratification possible, ce qui est conforme aux observations de l'expérience. Dans le cas du tube percé de trous en haut et en bas, la turbulence liée à l'écoulement d'eau douce n'est pas suffisante pour briser la stratification.

5. Conclusion

Les expériences sur maquette confirment la possibilité d'une intrusion saline diffuse dans un conduit karstique traversant une zone de l'aquifère envahie par de l'eau de mer. Les variations de salinité observées à la sortie de la maquette sont comparables à celles observées à la source Almyros d'Héraklion lors des crues provoquées par les pluies sur le bassin versant. L'augmentation de charge en entrée du système hydrogéologique ou de la maquette provoque une diminution de l'entrée d'eau salée dans le conduit, conjointement au phénomène classique de la dilution. Sur la maquette, lorsque le débit est relativement faible, et dans le cas du drain percé de trous en haut et en bas, un écoulement stratifié se met en place. Il n'est pas exclu que ce phénomène se produise également en conditions réelles, au moins sur une certaine longueur, comme cela a été suggéré pour expliquer la diminution du flux de sel à la source Almyros en fin d'étiage [1]. Toutefois, l'échelle réduite et les mesures pas assez précises sur la maquette n'ont pas permis de quantifier la profondeur réelle du conduit karstique, contrairement au modèle numérique, qui permet de calculer des valeurs très précises du développement probable du système karstique en profondeur [1,2]. En revanche, les résultats confirment que la salinité d'une source

karstique côtière saumâtre n'est pas nécessairement due à une connexion de conduits karstiques avec la mer, qui est l'explication classique. Ils montrent que la salinité d'une source karstique sous-marine, liée à l'intrusion d'eau de mer, peut tirer son origine de trois phénomènes, qui peuvent être combinés ou non [2–4,7] : (i) l'entrée directe d'eau salée par l'orifice de la source sous-marine comme observé dans les estuaires, (ii) l'entrée d'eau salée par un conduit annexe connecté directement à la mer en profondeur, (iii) l'entrée diffuse d'eau salée par les parois de la galerie karstique alimentant la source.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par une bourse TMR Marie-Curie de la Commission européenne. Merci à MM. Prinos et Dermisis, du laboratoire d'hydraulique de l'université de Thessalonique (Grèce) pour leur aide pendant les expériences. Une première version du manuscrit a été nettement enrichie et améliorée par la revue de M.G. de Marsily.

Références

- [1] B. Arfib, Étude des circulations d'eaux souterraines en aquifères karstiques côtiers : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce), thèse, université Paris-6, 2001, 343 p.
- [2] B. Arfib, G. de Marsily, J. Ganoulis, Les sources karstiques côtières en Méditerranée : étude des mécanismes de pollution saline de l'Almyros d'Héraklion (Crète), observations et modélisation, Bull. Soc. géol. France 173 (3) (2002) 245–253.
- [3] B. Blavoux, É. Gilli, C. Rousset, Alimentation et origine de la salinité de la source sous-marine de Portmiou (Cassis), principale émergence d'un réseau karstique hérité du Messinien, C. R. Geoscience 336 (2004).
- [4] O. Bonacci, T.R. Bonacci, Seawater intrusion in coastal karst springs: example of Blaz Spring (Croatia), Hydrol. Sci. J. 42 (1) (1997) 89–100.
- [5] R. Comolet, Mécanique expérimentale des fluides. Tome II. Dynamique des fluides réels, turbomachines, 2^e éd., Masson, 1976, 447 p.
- [6] G. de Marsily, Quantitative Hydrogeology, Academic Press, New York, 1986, 440 p.
- [7] L. Potié, J. Ricour, Études et captage de résurgences d'eau douce sous-marines, Ressources en eau (1974) 5–26.
- [8] D.J. Tritton, Physical Fluid Dynamics, second, Oxford Science, 1988, 519 p.