



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Caractérisation d'un système karstique à exutoire sous-marin : exemple de La Mortola (Italie)

Perrine Fleury^{a,b,*}, Michel Bakalowicz^c, Pierre Becker^d

^aHydroSciences Montpellier, cc MSE, 34095 Montpellier cedex 5, France

^bUMR Sisyphe, université Pierre-et-Marie-Curie, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France

^cCREEN-ESIB, Riad el Solh BP 11-0514, Beyrouth, Liban

^dGéocéan – Nymphéa Water, 520, avenue de Jouques, 13685 Aubagne cedex, France

Reçu le 27 juin 2006 ; accepté après révision le 17 avril 2007

Disponible sur Internet le 30 mai 2007

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Le système karstique de La Mortola (France–Italie), drainé par la source d'eau douce sous-marine de La Mortola, a été étudié à partir de mesures in situ réalisées à l'aide d'un captage sur la source sous-marine. Ces informations, couplées à l'étude du bassin d'alimentation, ont permis de caractériser le fonctionnement de ce système. Un modèle à réservoirs a ensuite été développé pour simuler les débits sur une période de 12 ans, afin de définir les conditions d'une éventuelle exploitation de la ressource en eau. **Pour citer cet article : P. Fleury et al., C. R. Geoscience 339 (2007).**

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Characterising a karst system with a submarine spring: the example of La Mortola (Italy). The karst system of La Mortola (France–Italy) discharges at the submarine freshwater spring of La Mortola. It was studied through in situ measurements made over 10 months in the submarine spring. The data, coupled with an investigation of the recharge area, allow us to interpret the functioning of the system. A reservoir model was then developed in order to simulate discharge time series from rainfall over a period of 12 years, with a view to proposing a plan for exploiting this freshwater resource. **To cite this article: P. Fleury et al., C. R. Geoscience 339 (2007).**

© 2007 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Karst ; Source sous-marine ; Instrumentation ; Mortola ; Modélisation ; Italie

Keywords: Karst; Submarine spring; Mortola; Monitoring; Modelling; Italy

Abridged English version

Introduction

Submarine springs have been known since Antiquity. Former studies of such springs were rather limited. The knowledge of these particular systems is presently

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail: p.fleury@brgm.fr (P. Fleury),
Michel.Bakalowicz@gmail.com (M. Bakalowicz),
info@nymphewater.com, info@geoccean.fr (P. Becker).

improving and a method to study them has been proposed [7,8]. This method, based on monitoring flow rate, salinity, and temperature at the submarine spring during one hydrological year, was used for analysing the functioning of the Mortola karst system.

System presentation

The Mortola karst system, situated partly in France, partly in Italy, has as its main outlet the submarine freshwater spring of La Mortola (Fig. 1). First observed by Rovereto [28], this submarine spring discharges at the base of a small limestone cliff at a –35-m depth, 800 m away from the coast. This outlet has an elliptical shape about 0.50 m wide and 0.30 m high. Other submarine outlets are located between the Mortola spring and the coast [32], most of them being close to La Mortola. Their size and flow rate are minor compared to those of the La Mortola spring. They are located along a joint going through La Mortola [32], linking them to the main outlet. The goal of this study, based on investigations on the recharge area and monitoring of flow rate, salinity, and temperature at the main spring, is to define the range of variation in flow rate and salinity and analyse the functioning of the karst system.

Hydrogeological settings: definition of the recharge area

The aquifer develops in Jurassic limestone. The extension and boundary conditions were defined from geological data and controlled by a geological field survey. The limestone is surrounded by Cretaceous marls, of very low permeability (Fig. 1). Local surface streams on marls are partly swallowed by limestone. Consequently, the recharge area of La Mortola is well defined, and it covers around 30 km². Karst landforms are poorly developed, despite the important relief, which gives a large karst-development potential. This is interpreted as the consequence of rapid and strong erosion at the surface, related to the Pliocene and Quaternary uplift and eustatic variations.

Functioning of the system

An innovative experiment system was developed by the Nymphaea Water Company: a tapping device was installed on the spring. The tapping system allows one to measure flow rate, salinity, and temperature of the freshwater, and to regulate the outflow with a gate. Because of the difficult submarine conditions, the data time series collected during the 2003–2004 hydro-

logical year are incomplete (Fig. 2). Moreover, the tapping device modifies in a reversible way the natural functioning of the system. It creates a difference in hydraulic heads between the main, tapped spring and the secondary springs, controlled by the sea level. The consequence is an intrusion of seawater into the secondary spring conduits, at times when the freshwater flow rate is low, and a mixing with freshwater in the main conduit discharging at La Mortola. Seawater intrusion is stopped either by a natural increase of the water head in the main conduit during floods, or by partial closure of the tapping system with a sluice gate. In such conditions, the salinity varies in the range 0.4–1.2 g/l, depending on the hydrological conditions. The data analysis allows reconstitution of a six-month time series for the 2003–2004 hydrological year, based on flow rate–salinity relationships (Figs. 5 and 6).

Modelling discharge time series from rainfall data

Because of the difficulty of monitoring and checking data at a submarine spring, it is not currently possible to obtain complete and long time series. Moreover, discharge and physical and chemical characteristics of these submarine springs vary in a wide range, like in any karst spring. Consequently, the estimate of the range of variation of flow rate and salinity is essential for determining if the spring may or not be exploited, and for defining the exploitation conditions. The modelling of the flow-rate time series from rainfall data is the best approach for estimating this range of variation, assuming that the conditions remain invariant.

A reservoir model was developed for that purpose using the VENSIM[®] simulator package (Figs. 7 and 8). It requires calculation of the annual water balance on the watershed, giving an estimation of the potential mean discharge of the system, about 140 l/s for the 2003–2004 hydrological year. The model is made of two reservoirs, whose parameters are fitted on the 2003–2004 time series. The model estimates the actual mean discharge at the La Mortola spring at about 80 l/s, during this especially dry year. The difference of 60 l/s with the potential mean flow rate given by the water balance is attributed to the uncontrolled outflow at secondary springs and to a significant surface run-off on marls, which is not swallowed into sinkholes. The use of the calibrated model on a 12-year rainfall time series gives the flow-rate range of variation, from 30 l/s and up to more than 1 m³/s, and an average flow rate of 200 l/s.

Conclusion

For the first time, a karst submarine spring was monitored with a tapping system equipped with a device recording salinity, temperature, and flow rate of the freshwater discharge. The La Mortola submarine spring is the main outflow of the karst system at 35 m below sea level. The watershed of the spring was determined and the functioning of the system was characterised in order to improve the knowledge on karst submarine springs, which are common all along the Mediterranean coasts. The extension of the system and the karst development conditions were defined. Field studies and geological conditions show that it develops in Jurassic limestone surrounded by very low-permeability calcareous marls. Surface run-off from marls partly participates to the recharge through swallow holes. This limestone has undergone several important karstification phases, whose prints were mostly eroded because of regional uplift during the Pliocene and Quaternary. The result is a system with a karst drainage structure poorly developed, characterised by small-size conduits, which partly protect the karst from seawater intrusion. The karst system extends over about 30 km², with a mean annual freshwater discharge of about 140 l/s for the studied hydrological year (2003–2004). Because large variations in the spring flow rate were observed, even if not as wide as at most karstic springs, an attempt was made to estimate the range of variation of flow rate and salinity for different hydrological conditions, in order to characterise the spring potential for freshwater exploitation. A reservoir model was developed, tested on the very short available time series; it was applied to a 12-year-long rainfall time series. The results show that (i) small annex springs play an important role by discharging in average about 40% of the total discharge, (ii) they may work as seawater intrusion points if the exploitation of the tap system is not well adapted, and (iii) the minimum exploitable flow rate is around 30 l/s, limiting the significance of the spring. This study can now serve as an example for investigating coastal karst aquifers with submarine outflows.

1. Introduction

Les sources sous-marines sont connues depuis l'Antiquité. Ainsi, dans l'Ancien Testament, Job révèle la présence d'une source sous-marine au large de l'île d'Aradus, sur les côtes actuelles de la Syrie. Cette source aurait été captée il y a trois mille ans par les Phéniciens [23]. Mais c'est à partir des années 1960 que les sources sous-marines ont été véritablement étudiées,

car on considérait que cette ressource précieuse devrait pouvoir être utilisée. Les premières études ont permis de les localiser assez précisément, notamment par des observations in situ. Déjà, au début du XX^e siècle, Gruvel [18–20] avait repéré des sources sous-marines sur les côtes syriennes et libanaises. La thermographie et la photographie infrarouge se sont également révélées efficaces pour leur localisation. De nombreuses côtes furent ainsi explorées ; citons les côtes d'Aquitaine [24,25], du Languedoc [5,6], du Liban [21,22], de Grèce [17] et d'Espagne [12].

Si ces travaux ont permis de localiser de façon précise les sources, il faut déplorer le fait que les études soient restées très sommaires d'un point de vue hydrologique, du fait de la complexité technique des mesures in situ en mer. Les auteurs proposent parfois une estimation visuelle du débit, accompagnée d'une mesure ponctuelle de la salinité. Aujourd'hui, la connaissance de ces systèmes particuliers, ouverts sur la mer, s'est nettement améliorée et leur méthodologie d'étude a été précisée [7,8]. Elle passe par la mesure en continu, sur au moins un cycle hydrologique, des paramètres physicochimiques (le débit, la température et la conductivité électrique) au niveau des exutoires principaux et sur les conduits ouverts sur la mer. Cette méthodologie a été utilisée pour l'étude de la source karstique saumâtre de l'Almyros d'Héraklion, en Grèce, permettant alors de caractériser le fonctionnement du système et ses relations avec le milieu marin [1–4]. Le même type d'étude a été réalisé sur le système espagnol de Moraig-Toix, à partir de l'instrumentation des deux principaux conduits ouverts sur le milieu marin [11,13]. Une étude comparable est en cours sur la source sous-marine de Port-Miou [9], après les premières expériences menées il y a plus de 20 ans [27]. L'étude de la source de La Mortola présentée ici repose également sur la mesure du débit, de la salinité et de la température de la source. Cette étude est innovante, car elle a nécessité la mise en place d'un dispositif de captage supportant l'instrumentation, qui ne pouvait pas être placée directement dans la source.

2. Présentation du système

Le système karstique de La Mortola a pour principal exutoire la source sous-marine du même nom. Cet aquifère est situé en partie en France et en partie en Italie. Observée pour la première fois par Rovereto [28], cette source sous-marine s'écoule à l'aplomb d'une petite falaise calcaire, par –35 m de fond, à 800 m de la côte. Cet exutoire, de faible dimension et de forme

elliptique, mesure environ 50 cm de largeur et 30 cm de hauteur. D'autres exutoires sous-marins existent entre La Mortola et la côte [32] ; ils sont d'importance secondaire en termes de dimensions et de débit. Plusieurs d'entre eux sont situés à proximité de La Mortola, le long d'une fracture qui passe par la source principale [32], reliant ces exutoires secondaires à cette localité. Cette source, étudiée à partir de mesures ponctuelles dans les années 1960 [10,29] est apparue comme relativement douce et de débit notable, supérieur à 100 l/s. Elle fut pressentie pour l'alimentation des villes côtières et un premier captage expérimental fut mis en place en 1969. Il était constitué d'une conduite de faible diamètre introduite dans la source remontant en surface [30–32].

La zone de recharge supposée de la source de La Mortola est comprise entre les villes de Menton et Sospel dans les Alpes-Maritimes. Cette zone est essentiellement composée de calcaires marneux du Crétacé et des calcaires massifs du Jurassique. Les sources de Cabbé, situées à moins de 10 km à l'est de La Mortola, sont également les exutoires de ces massifs calcaires [15,16]. Ces formations tombent en falaise dans la mer et forment un relief important, allant jusqu'à une altitude de 1000 m à 3 km de la côte. Sur ces reliefs, les activités anthropiques sont quasi-inexistantes.

Nous avons cherché à définir l'étendue et les limites du bassin d'alimentation de cette source, afin d'en établir le bilan hydrologique, puis d'analyser son fonctionnement d'ensemble à partir des données acquises. Les paramètres physicochimiques et le débit de La Mortola ont, en effet, été mesurés à la faveur du captage expérimental de la source sous-marine réalisé par l'entreprise Nymphéa Water. La chronique de données, malheureusement incomplète sur la période d'étude, a dû être en partie reconstituée. Ces données ont permis de construire un modèle pluie-débit destiné à la prévision et à la reconstitution des débits. Cette modélisation conforte les premières interprétations relatives au fonctionnement et à la structure du système. Cette approche du débit est fondamentale pour le dimensionnement d'un dispositif de captage sous-marin adapté et pour permettre la gestion prévisionnelle de la ressource ; c'est donc un outil d'aide à la décision, dans ces systèmes particuliers où l'instrumentation à long terme est très contraignante, sinon impossible.

3. Étude réalisée sur le bassin d'alimentation

Les analyses géologiques et géomorphologiques ont permis de définir la zone d'alimentation de l'aquifère, ainsi que certaines conditions de sa recharge. Les

calcaires du Jurassique constituent ainsi la principale formation aquifère de la région, comprise entre deux ensembles globalement très peu perméables, formés par les calcaires marneux du Crétacé (Fig. 1). L'absence de trace de réseau de ruissellement de surface sur les calcaires est aussi un argument supplémentaire en faveur de la définition de l'unité hydrogéologique, laquelle se limite simplement par le contact calcaires du Jurassique–calcaires marneux du Crétacé.

Sur l'ensemble du bassin versant, les calcaires jurassiques présentent de nombreuses traces d'une karstification en plusieurs phases. Il existe des témoins de karstification ancienne. Ce sont surtout des remplissages de cavités complètement colmatées, observables le long de la côte. Leur étude a montré que les calcaires jurassiques sont passés par une phase de karstification intense, qui a pu se produire au cours du Messinien (5.5 Ma), alors que le niveau marin était de 1500 m sous le niveau actuel. Depuis cette période, la région a subi une surrection d'au moins 400 m, comme le montre la limite Pliocène marin/continental observée au mont Bellenda (altitude : 500 m), au nord-ouest du cap Mortola [14]. En parallèle, l'intense serrage est-ouest post-miocène, au cours des derniers 5 Ma, a eu pour effet de créer des écaillures de calcaire jurassique (Fig. 1). Ces bancs, très redressés, présentent une faible surface affleurante et un relief prononcé. Du fait de l'important relief et de la forte surrection plio-quaternaire, ces niveaux ont subi une importante érosion, qui a fait disparaître la plupart des marques des karstifications anciennes. Enfin, depuis le Pliocène, le massif calcaire a été soumis à une nouvelle karstification, dont quelques témoins ont été observés au nord du bassin d'alimentation. Le karst a été alimenté essentiellement par les précipitations, accrues du fait de sa position en relief, dominant les marnes. Cependant, le karst est actuellement peu développé, malgré un potentiel de karstification favorable ; il est possible que l'absence de stabilisation du niveau de base en soit la cause, du fait à la fois de la surrection et de la remontée post-würmienne du niveau marin.

Hormis la présence de sources à très faible débit (au maximum quelques litres par minute), liées à des niveaux peu perméables, il n'existe aucune source à débit important sur l'aire de recharge supposée. De ce fait, l'aquifère se décharge complètement en mer.

Le bassin d'alimentation correspond aux affleurements de calcaires, limités par les formations marneuses jouant le rôle de barrière étanche. Cette surface représente environ 28 km² ; il est nécessaire de lui ajouter une partie de celle du bassin versant superficiel du ruisseau de Ciambairo, puisqu'une perte partielle a



Fig. 1. Extrait de la carte géologique Menton–Nice [14]. Position des ruisseaux, de la perte du ruisseau de Ciambairo, des stations Météo France, de la source de La Mortola et des limites hydrogéologiques de son bassin d'alimentation.

Fig. 1. Menton–Nice geological map [14]. Location of creeks, of swallow hole, of Météo France weather stations, of the La Mortola spring, and of the hydrogeological boundaries of the recharge area.

été mise en évidence sur l'aval de son cours (Fig. 1) ; cette surface est de 5 km² environ. La surface totale du bassin d'alimentation de La Mortola est donc de l'ordre de 30 km².

4. Analyse du fonctionnement

4.1. Données disponibles de salinité et de débit

L'instrumentation intégrée au dispositif de captage placé au droit de la source sous-marine comprend un débitmètre électromagnétique à manchette et une sonde de salinité/température. Les données recueillies par Nymphéa Water, au pas de temps horaire ou bihoraire selon les périodes, sont récapitulées dans la Fig. 2. La salinité est déduite de la mesure de la conductivité électrique par une formule classique. La mesure de la salinité est donnée avec une incertitude inférieure à

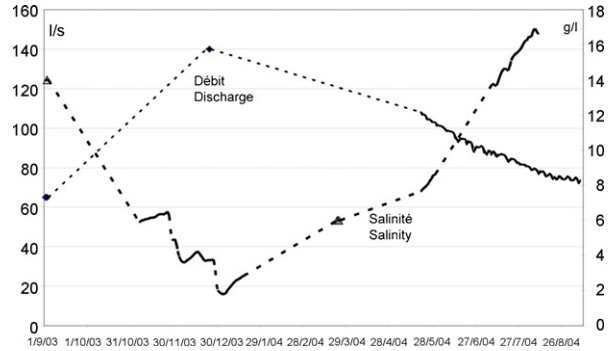


Fig. 2. Salinité moyenne journalière et débit moyen journalier d'eau saumâtre transitant par le système de captage.

Fig. 2. Mean daily salinity and mean daily brackish water discharge through the tapping system.

1 %. Concernant le débit, l'incertitude est de quelques pour-cent.

Les données manquantes sont dues à des dysfonctionnements du matériel, liés aux difficultés de travail en domaine marin. La chronique de salinité fait apparaître l'inconsistance de certaines données. En effet, le 25 mars 2004, la mesure directe de la salinité donnait 6 g/l, alors que, selon l'enregistrement, elle était comprise entre 11 et 12 g/l du 26 mars au 22 avril 2004. Compte tenu des autres mesures acquises, la valeur de 6 g/l paraît correcte ; c'est donc elle que nous utiliserons par la suite et les valeurs enregistrées du 26 mars au 22 avril 2004 ne seront pas utilisées. Des mesures ponctuelles de la salinité ont été réalisées : à l'exception de la mesure du mois de mars 2004 (précédemment discutée), les valeurs mesurées étaient identiques à celle de la chronique, validant ainsi la chronique des données de salinité.

Le dispositif de captage est constitué d'une colonne métallique de 10 m de haut, scellée sur la source par une collerette cimentée ; il modifie de façon réversible le fonctionnement naturel du système par les modifications de charge qu'il introduit dans l'écoulement. En effet, sa mise en place a eu pour effet de changer le gradient de charge hydraulique entre l'eau douce dans le conduit et la mer. Avant captage, à la source et aux sources secondaires situées en périphérie, la charge hydraulique de l'eau douce aux exutoires était supérieure ou égale à la charge hydraulique de la mer, qui était de 35 m d'eau, de densité 1,025 (Fig. 3). L'eau de la source était douce, de salinité inférieure à 1 g/l [15]. La mise en place du dispositif a réduit à 25 m d'eau de mer la charge au nouvel exutoire, situé en haut de la colonne (Fig. 3). Il apparaît, par conséquent, une différence de charge d'eau de mer entre la source

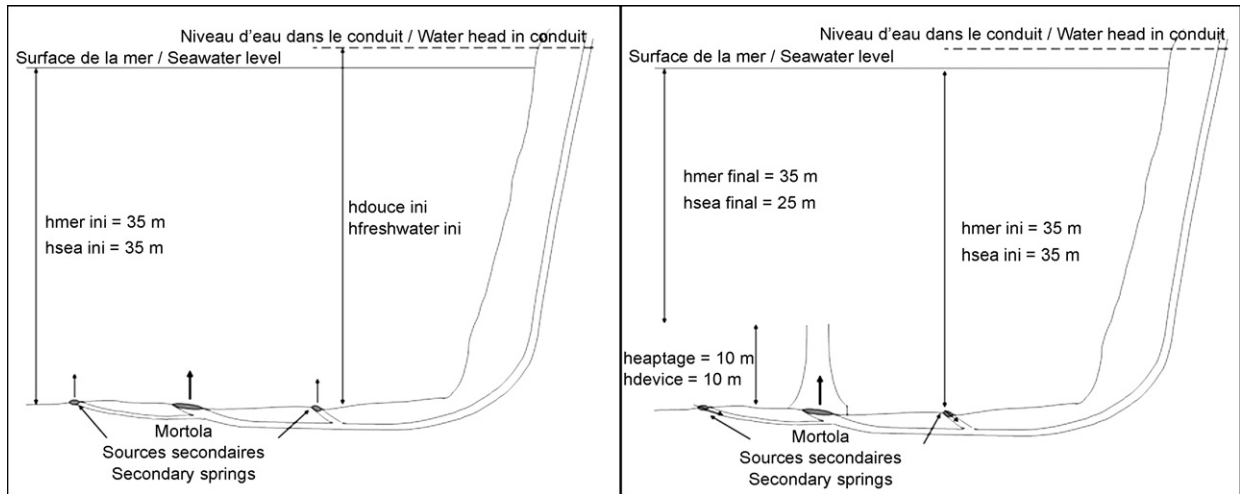


Fig. 3. Relations entre l'eau douce et l'eau de mer avant et après le captage. $h_{mer\ ini}$ est la hauteur de la colonne d'eau de mer initiale, $h_{mer\ final}$ celle de la colonne d'eau de mer après le captage, $h_{douce\ ini}$ celle de la colonne d'eau douce initiale, et $h_{capture}$ celle du dispositif de captage.

Fig. 3. Freshwater and seawater relations before and after tapping the spring. $h_{sea\ ini}$ is the initial seawater height, $h_{sea\ final}$ is the final seawater height above the freshwater outflow, $h_{freshwater\ ini}$ is the initial freshwater height, and h_{device} the height of the tapping device.

principale et les petites sources latérales, lesquelles ont toujours 35 m de charge d'eau de mer à leur exutoire. Cette différence de charge crée un effet d'aspiration sur le conduit principal, qui est responsable d'une inversion du gradient de charge hydraulique entre l'eau douce et la mer au niveau des sources secondaires. Cette inversion entraîne localement une intrusion d'eau de mer par ces petits conduits situés en périphérie et connectés à la source principale, augmentant ainsi la salinité de l'eau en sortie de colonne. Le gradient de charge naturel peut cependant être rétabli, grâce à une mise en pression de l'eau de la source par vannage du dispositif de captage. La salinité mesurée évolue alors entre 0,4 et 1,2 g/l en fonction des saisons.

Par ailleurs, les premières données de débit, acquises pendant deux jours à un pas de temps de 2 min, mettent en évidence l'influence de la marée sur le fonctionnement du système, malgré son amplitude réduite (moins de 30 cm). Ainsi, à marée haute, la charge hydraulique imposée à la source par la colonne d'eau de mer est maximale, les débits sont minimaux. À marée basse, c'est le phénomène inverse qui est observé. Au cours de cet essai, la salinité, mesurée ponctuellement, était de 14 g/l, le débit d'eau saumâtre variait entre 64 et 67 l/s (Fig. 4). Ces données acquises permettent d'appréhender la bonne qualité des mesures de débit : il s'agit d'un point important de la méthodologie d'étude.

4.2. Reconstitution de certaines valeurs de débit et de salinité

La salinité de l'eau sortant du dispositif de captage provient d'un mélange entre l'eau douce de l'aquifère et l'eau de mer qui pénètre dans le système de captage au niveau des sources secondaires. Dans ce qui suit, le débit transitant dans le captage est appelé « débit total », pour le distinguer du débit d'eau douce, déduction faite du flux d'eau de mer dans le mélange. Par ailleurs, les données obtenues montrent que la salinité du mélange qui transite par le système de captage est fonction du débit. Les données de débit et de salinité acquises conjointement sur le cycle 2003–2004 permettent de définir la relation entre la salinité et le débit total transitant par le dispositif de captage. Trois relations

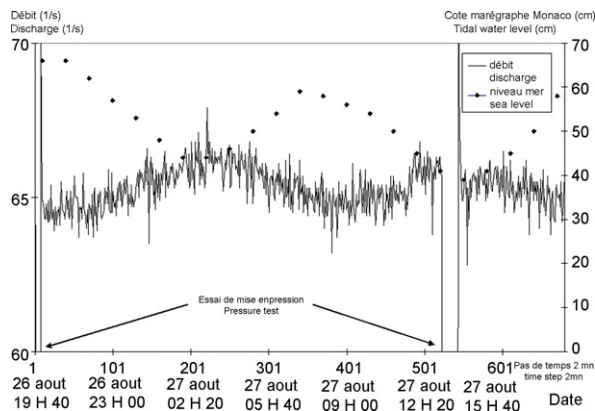


Fig. 4. Débit mesuré au pas de temps 2 min les 26 et 27 août 2003.

Fig. 4. Measured discharge every 2 min (26–27 August 2003).

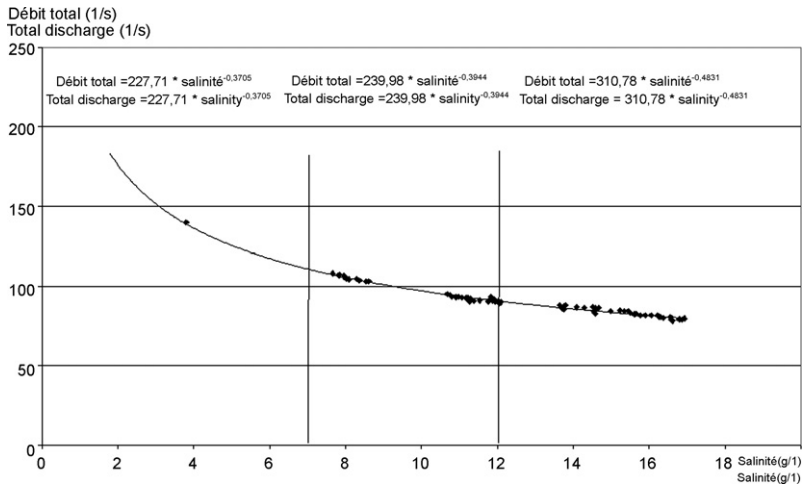


Fig. 5. Débit en fonction de la salinité et relations liant le débit à la salinité.

Fig. 5. Discharge as a function of salinity and relationships between discharge and salinity.

empiriques déterminées à partir des droites de régression appliquées aux couples de données (débit ; salinité) sont définies pour trois intervalles de débit et de salinité (Fig. 5). Les deuxième et troisième relations, grâce aux nombreux couples de données, permettront une reconstitution fiable des données sur ces intervalles. À l'inverse, sur le premier intervalle, qui est défini à partir de la courbe de régression sur l'ensemble de la chronique et d'un seul couple de données, l'extrapolation sera beaucoup plus approximative.

Ces relations (Fig. 5) traduisent le fait que la salinité croît lorsque le débit décroît, sous l'effet de la pénétration d'eau de mer dans le système de captage. L'effet de l'intrusion d'eau de mer par les sources secondaires est local. Il est lié à la dépression induite par la colonne du dispositif de captage, qui mesure 10 m. La charge hydraulique dans l'aquifère n'intervient pas, car elle s'applique de la même façon sur les petites sources et le nouvel exutoire. En revanche, la charge d'eau de mer sur l'exutoire capté est plus faible que celle sur les petites sources. Cette différence de charge facilite l'écoulement d'eau douce dans le captage ; si la charge dans l'aquifère est trop faible, elle peut provoquer l'entrée d'eau de mer par les petites sources.

À partir de ces relations, une reconstitution du débit peut être tentée pour les périodes où seule la salinité a été mesurée, et réciproquement. Les chroniques ainsi obtenues permettent de calculer le débit d'eau douce qui transite par le système de captage (Fig. 6), la salinité de l'eau douce étant supposée nulle et celle de l'eau de mer connue. Ce débit est assimilé au débit naturel de la source.

Le travail effectué permet de reconstituer une partie des chroniques de débit d'eau douce. Toutefois, du fait des nombreuses lacunes, ces données sont insuffisantes à la détermination du débit annuel moyen et du volume d'eau douce écoulé à La Mortola. D'autres méthodes ont donc été utilisées pour estimer le débit moyen annuel et approcher la chronique des débits.

5. Développement d'un modèle pluie-débit

Dans un premier temps, le débit moyen est estimé à partir du bilan hydrologique. Les travaux de terrain ont conduit aux hypothèses suivantes : le ruissellement sur la partie carbonatée est négligeable, ce qui est fréquemment observé pour les aquifères bien karstifiés, et la source de La Mortola est l'unique exutoire du

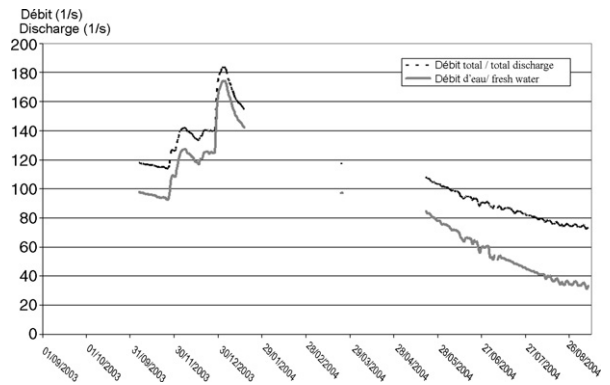


Fig. 6. Chroniques reconstituées du débit d'eau douce et du débit total transitant par le dispositif de captage.

Fig. 6. Reconstructed time series of freshwater discharge and total discharge through the tapping system.

système. L'ETR (évapotranspiration réelle) est calculée pour un cycle moyen à partir de la formule de Turc annuelle. La température moyenne annuelle nécessaire à ce calcul a été mesurée sur une petite source du bassin d'alimentation, située à l'altitude moyenne de ce bassin. Elle est de 13 °C. L'ETR calculée est ainsi de 500 mm/an. Les précipitations annuelles sur la zone sont d'environ 650 mm. L'infiltration est donc de 150 mm/an. Le débit moyen estimé est ainsi d'environ 140 l/s.

Le modèle numérique a ensuite été développé. Il est calé sur les périodes où il existe des données mesurées ou reconstituées du cycle 2003–2004. Ce modèle est du type réservoirs en cascade ou en parallèle fonctionnant au pas de temps journalier, développé à l'aide du logiciel simulateur de système VENSIM® [33]. Ce type de modèle a été testé avec succès sur une dizaine de sources karstiques terrestres [13]. En amont du modèle est placé un réservoir, dit réservoir *sol*. Ce réservoir permet le calcul de l'infiltration. Il alimente les réservoirs qui assurent le transfert. L'infiltration est calculée à partir des précipitations et de l'ETR.

Le réservoir *sol* (Fig. 7) est caractérisé par une hauteur de remplissage, $H_{\text{réservoir sol}}$, qui fluctue selon les entrées et les sorties du réservoir. Au temps t , cette hauteur est

égale à la hauteur au pas de temps précédent, à laquelle on ajoute la hauteur des précipitations et dont on soustrait l'ETR et l'eau évacuée par le réservoir (infiltration). La hauteur H_0 définit la saturation du réservoir. L'infiltration se produit quand $H_{\text{réservoir sol}} > H_0$; sinon, le réservoir *sol* est dit sous-saturé, et ne fournit pas d'eau aux réservoirs situés en aval.

Un seuil de sous-saturation, H_{min} , est calé dans ce réservoir (Fig. 7). Lorsque $H_{\text{réservoir sol}} < H_{\text{min}}$, l'ETR journalière est considérée comme nulle. Cette situation caractérise les mois d'été, lorsque les précipitations sont faibles ou absentes et la végétation très active. Ce seuil permet d'éviter une trop forte sous-saturation du réservoir *sol*.

L'ETR annuelle est égale à la somme des ETR journalières prises en compte dans le modèle, de sorte que cette ETR annuelle soit égale à l'ETR annuelle définie par la formule de Turc. Ce paramètre est assez peu sensible pour la modélisation. Une ETR journalière de 1,5 mm a été attribuée pour les mois de décembre à avril, et de 3 mm pour les mois de mai à novembre.

La valeur de H_{min} est calée par rapport à la première précipitation qui génère une augmentation du débit après un étiage long, de sorte que le réservoir *sol* crée une infiltration au bon moment. Dans ce modèle, $H_{\text{min}} = -50$ mm.

Ensuite, l'infiltration atteint deux réservoirs de routage en parallèle. Elle est affectée à chacun d'eux par des coefficients X_1 et X_2 , dont la somme est égale à l'unité.

Les réservoirs de routage sont caractérisés par une loi de vidange de type Maillet, qui s'écrit :

$$H_{(t+1)} = \alpha \times H_{(t)} \quad (1)$$

avec H , hauteur d'eau dans le réservoir (m) et α , coefficient de tarissement (j^{-1}).

Le premier réservoir, dit de *vidange lente*, est caractérisé par une hauteur d'eau H_1 et un coefficient de tarissement α_1 . D'un point de vue conceptuel, ce réservoir est assimilé à la zone noyée de l'aquifère. Le second, dit de *vidange rapide*, est caractérisé par une hauteur d'eau H_2 et un coefficient de tarissement α_2 . Il représente les débits issus de la zone d'infiltration et transitant directement par les conduits connectés à la source.

Ce premier modèle ne donnait pas satisfaction. En effet, à partir de l'infiltration calculée par le bilan hydrique du sol, trop d'eau transitait dans le modèle, ce qui conduisait à une forte surestimation du débit de la source. Il a fallu ainsi diminuer l'infiltration de 43 % pour approcher le débit mesuré. Un troisième réservoir en parallèle, appelé *réservoir annexe*, a donc été ajouté ;

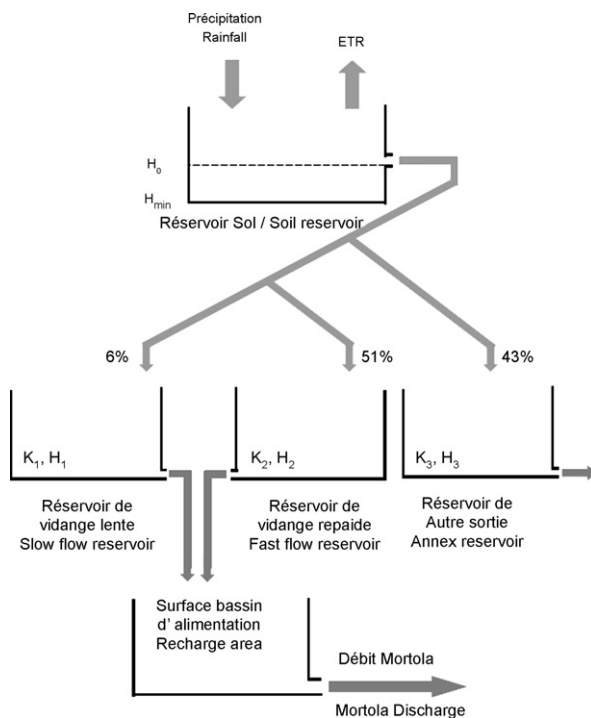


Fig. 7. Structure générale du modèle développé pour la source de La Mortola.

Fig. 7. General structure of the model developed for simulating the functioning of the Mortola spring.

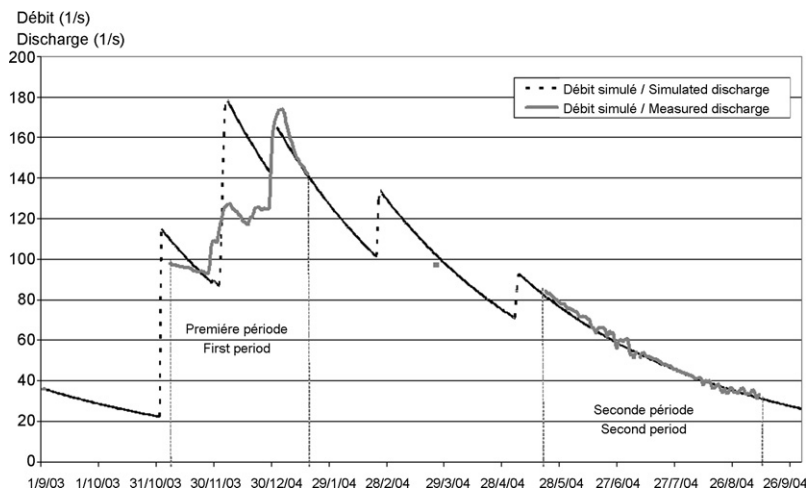


Fig. 8. Débits d’eau douce de La Mortola simulés et reconstitués.

Fig. 8. Mortola freshwater discharge simulated and reconstructed from the data.

ses sorties ne sont pas connues. Ce nouveau modèle est schématisé sur la Fig. 7. Conceptuellement, le *réservoir annexe* permet d’alimenter le ruissellement et aussi les autres exutoires sous-marins non pris en compte. Les résultats de la simulation sont présentés sur la Fig. 8.

Du fait de l’approximation de la reconstitution des données de débit d’eau douce en période de crue et, surtout, du fait que la chronique est incomplète, il est difficile de simuler plus précisément les débits d’eau douce de la source de La Mortola.

Afin d’évaluer la qualité de la simulation, le critère classique de calage de Nash a été calculé sur les deux périodes où le débit a été jugé représentatif de la réalité, à savoir du 6 novembre 2003 au 18 janvier 2004 et du 19 mai au 7 septembre 2004. Le critère de Nash C_{Nash} est considéré comme un estimateur de la qualité de la simulation [26]. Il est donné par :

$$C_{Nash} = 1 - \frac{\sum(Q_{mes} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{mes} - Q_{moy})^2}$$

avec Q_{mes} , débit mesuré ; Q_{sim} , débit simulé ; Q_{moy} , moyenne du débit mesuré sur la série.

Sur la première période, C_{Nash} est égal à 8 % et sur la seconde à 98 %. Calculé de façon globale sur les deux périodes, le critère est égal à 86 %.

Le modèle permet une simulation des crues au bon moment, comme on le vérifie sur les trois crues enregistrées de novembre 2003 à janvier 2004. L’intensité du deuxième événement est toutefois mal rendue. En effet, pour la crue de fin novembre 2003, les débits simulés sont beaucoup trop forts. Ils atteignent près de 170 l/s, alors que les débits reconstitués à partir

de la salinité sont d’environ 125 l/s. C’est à cause de cet écart important sur les fortes valeurs de débit que le critère de Nash est mauvais sur la première période ; en effet, le critère de Nash donne plus de poids à ces valeurs fortes. Le débit maximal de la crue simulée fin décembre 2003 est assez proche du débit reconstitué à cette période. Concernant le tarissement, il est bien simulé sur l’ensemble de la période de mai à septembre 2004, ce qui est confirmé par le critère de Nash. Ainsi, pour les périodes de fortes crues, le modèle risque de mal estimer le débit.

Le débit simulé permet d’approcher le débit naturel de la source lors des lacunes d’enregistrement et fournit une estimation du flux total évacué à La Mortola. Ce flux annuel total est estimé à $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour le cycle hydrologique 2003–2004, soit un débit moyen de 80 l/s. Cette valeur est nettement inférieure à celle donnée par le bilan hydrologique du bassin versant de la source, environ 140 l/s. Cette différence est probablement liée aux nombreuses incertitudes et approximations, et en particulier la part négligée du ruissellement sur les surfaces peu perméables du bassin d’alimentation et les sorties non contrôlées d’eau douce par des sources sous-marines secondaires.

La gamme réelle de variation des débits sur une longue période a été approchée en utilisant le modèle ainsi calé pour simuler les débits à partir d’une chronique de précipitation de 12 années. Les débits simulés évoluent alors entre moins de 30 l/s et plus de 1 m³/s. Sur cette chronique de débit simulé, on observe que, pendant 2580 jours, soit sept années, le débit a été supérieur au débit maximal observé sur le cycle 2003–2004. Il est utile de connaître cette gamme de variation,

à la fois pour le dimensionnement de l'ouvrage de captage, mais aussi pour évaluer son exploitabilité et gérer convenablement la ressource. Il faut toutefois garder à l'esprit que le modèle a été calé sur le cycle 2003–2004, cycle particulièrement sec. Les débits simulés pour les cycles secs seront, dans l'ensemble, bien représentés. En revanche, pour les cycles beaucoup plus humides, nous n'avons pas pu prendre en considération dans le modèle les différents mécanismes qui pourraient intervenir alors (augmentation du ruissellement, part d'eau vers le réservoir annexe différente, effet de chasse, etc.). Il est donc probable que, pour les cycles plus humides, il existe des différences notables entre les débits simulés et réels. C'est pourquoi les débits simulés sur les périodes humides doivent être considérés comme des indicateurs d'un ordre de grandeur et d'une tendance générale d'évolution plutôt que comme une estimation fiable.

6. Conclusion

Pour la première fois, le débit et la salinité d'une source sous-marine ont pu être mesurés en continu grâce à un captage et une instrumentation installés sur la source. Cette étude a conduit à localiser et caractériser l'aquifère dont la source sous-marine de La Mortola est l'exutoire principal. Cet aquifère karstique développé dans les calcaires jurassiques a subi des phases de karstification anciennes importantes, dont les manifestations ont globalement été érodées à la suite d'une forte surrection régionale au cours du Plio-Quaternaire. Il en résulte un karst actuel peu développé et peu fonctionnel. Cette caractéristique permet à la source de ne pas être l'aboutissement de conduits ayant une capacité d'évacuation surdimensionnée par rapport aux débits d'étiage ; cette situation évite ainsi, en conditions naturelles, l'intrusion d'eau de mer dans le système karstique. Le bassin d'alimentation est clairement défini par la géologie : ce sont les calcaires jurassiques, entourés de limites étanches. Ils reçoivent localement des ruissellements sur les marnes, en sorte que le bassin d'alimentation de La Mortola couvre environ 30 km², ce qui permet, à partir du bilan hydrologique, d'approcher le débit moyen d'eau douce au cours du cycle étudié (2003–2004), de l'ordre de 140 l/s.

Les données acquises à la source sont malheureusement incomplètes, du fait des difficultés techniques rencontrées. Elles permettent, cependant, de reconstituer la chronique étudiée, à la fois au moyen de la corrélation liant le débit à la salinité de l'eau sortant du captage et d'un modèle pluie-débit. La simulation fait apparaître qu'une partie non négligeable de l'infiltration (supérieure

à 40 %) ne participe pas à l'écoulement de la source de La Mortola. Cette différence peut être due à la non-prise en compte dans le modèle de l'existence d'exutoires sous-marins annexes, mais aussi du ruissellement sur les marnes. Calculé à partir de la chronique reconstituée, le débit moyen d'eau douce de La Mortola est de l'ordre de 80 l/s. Les paramètres calés du modèle rendent compte du faible développement de la karstification.

Dans l'hypothèse d'une exploitation de cette ressource en eau non conventionnelle, ces données pourront être utilisées pour la gestion du captage de la source. La démarche présentée dans cette étude doit être considérée comme une approche méthodologique de l'évaluation des caractéristiques des sources sous-marines et des aquifères karstiques côtiers, en vue de leur prise en compte dans une gestion intégrée des ressources en eau.

Références

- [1] B. Arfib, Étude des circulations d'eaux souterraines en aquifère karstique côtier : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce), thèse, université Paris-6, 2001 (337 p.).
- [2] B. Arfib, Écoulements préférentiels en aquifères karstiques côtiers : impacts sur la salinité de l'eau dans le système de l'Almyros d'Héraklion, Crète, Grèce, in : 7^e colloque en pays calcaire et milieu fissuré, 2001, 13–16.
- [3] B. Arfib, J. Ganoulis, Modélisation physique de l'intrusion d'eau de mer dans un aquifère karstique : cas de l'Almyros d'Héraklion (Crète), C. R. Geoscience 336 (11) (2004) 999–1006.
- [4] B. Arfib, G. de Marsily, Modeling the salinity of an inland coastal brackish karstic spring with a conduit-matrix model, Water Resour. Res. 40 (11) (2004) W1150601–W1150610. , doi:10.1029/2004WR003147.
- [5] C. Armand, J. Avias, Note préliminaire sur l'étude de l'hydrodynamique, de la salinité, de la température et de la pollution des eaux des étangs côtiers du Languedoc-Roussillon par télédétection au moyen de senseurs infrarouge, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D 273 (1971) 1910–1913.
- [6] J. Avias, G. Marjollet, Note préliminaire sur la possibilité, dans certaines conditions de détecter la localisation des aquifères fissurés karstiques par télédétection radiométrique infrarouge aéroportée, d'après un exemple pris dans les karsts nord-montpelliérains dans la région du bois de Carnas (Gard), C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D 276 (1973) 157–159.
- [7] M. Bakalowicz, P. Fleury, N. Dörfli, J.-L. Seidel, Coastal karst aquifers in Mediterranean regions. A valuable ground water resource in complex aquifers, in : *Technologia de la Intrusion de Agua de mar en Acuiferos Costeros* : países mediterraneos (TIAC), Instituto Geológico y Minero de España Publ., Alicante, *Hydrogeologia y aguas subterráneas* 8 (2) (2003) 125–140.
- [8] M. Bakalowicz, P. Fleury, B. Jouvencel, J.-J. Promé, P. Becker, T. Carlin, N. Dörfli, J.-L. Seidel, P. Sergent, Coastal karst aquifers in mediterranean regions. A methodology for exploring, exploiting and monitoring submarine springs, in : *Technologia de la Intrusion de Agua de mar en Acuiferos Costeros* : países mediterraneos (TIAC), Instituto Geológico y Minero de España

- Publ., Alicante, *Hydrogeologia y aguas subterranas* 8 (2) (2003) 673–680.
- [9] B. Blavoux, É. Gilli, C. Rousset, Alimentation et origine de la salinité de la source sous-marine de Port-Miou (Marseille–Cassis). Principale émergence d'un réseau karstique hérité du Messinien, *C. R. Geoscience* 336 (6) (2004) 523–533.
- [10] F. Calvino, A. Stefanon, Osservazioni Geologiche sulla Polla Rovereto e le altre sorgenti sottomarine della Mortola (Riviera di Ponente), *Atti Ist. Geol. Univ. Genova* (1963) 205–239.
- [11] J.M. Cortes, A. Antoranz, S. Menvielle, A. Ratsimandresy, J. Cisneros, S. Ramos, M.C. Cabrera, V. Serrano, J. Mateu, La intrusión marina en el sistema de cuevas Moraig-Toix. Un estudio para la recuperación del acuífero de la depresión de Benissa (Marina Alta–Alicante), in : V^o Congreso Geológico de España, Alicante, 2000 (26 p.).
- [12] J.M. Espejo Molina, M.C. Fernandes Luanco, L. Linares Girela, Inventario de surgencias de aguas de origen continental en el litoral mediterráneo del sur de España, mediante utilización de sensores térmicos aeroportados con apoyo de técnicas oceanográficas e hidrogeológicas, in : Estado del arte a nivel nacional e internacional, Almunecar, 1988, 191–228.
- [13] P. Fleury, Sources sous-marines et aquifères côtiers méditerranéens. Fonctionnement et caractérisation, thèse, université Paris-6, 2005 (286 p.).
- [14] B. Gèze, Carte géologique de Menton au 1:50,000^e, n^o XXXVII – 42 et 43, BRGM, 1968.
- [15] É. Gilli, Étude des sources karstiques sous-marines et littorales des Alpes-Maritimes entre Menton et Nice. Deuxième partie, étude des anomalies, ministère de l'Environnement, direction régionale de l'Environnement PACA, 1997 (55 p.).
- [16] É. Gilli, Détection des sources sous-marines et précision de l'impluvium par mesure des variations de salinité. L'exemple de la source de Cabbé-Massolins (Roquebrune-Cap-Martin, France), *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 329 (2) (1999) 109–116.
- [17] J.-C. Gros, P.-C. Lévêque, N. Papakis, C. Soubourou, Hydrogéologie et télédétection, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 283 (1976) 1393–1396.
- [18] A. Gruvel, De quelques particularités océanographiques observées sur les côtes de Syrie, *C. R. Acad. Sci. Paris* 189 (1929) 111–112.
- [19] A. Gruvel, De quelques sources marines observées sur les côtes Libano-Syriennes, *C. R. Acad. Sci. Paris* 191 (1930) 66–67.
- [20] A. Gruvel, Les États de Syrie. Richesses maritimes et fluviales. Exploration actuelle–avenir, Société des éditions géographiques, maritimes et coloniales (Bibliothèque de la faune des colonies française), Paris, 1931 (453 p.).
- [21] B. Hakim, Contribution à la détection des sources sous-marines et littorales de la côte libanaise par thermoradiométrie infrarouge (secteur Beyrouth–Enfe), DESS, université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier (1974) (30 p.).
- [22] M. Khawlie, A. Shaban, C. Abdallah, Evaluating the potentials of submarine springs: an unconventional water source for the coastal area – Lebanon, ESCWA Expert Group Meeting, Beyrouth, 14–17 novembre 2000.
- [23] F.A. Kohout, Submarine springs. *The Encyclopedia of Oceanology*, Fairbridge, Reinhold, New York, 1966, pp. 878–883.
- [24] P.-C. Lévêque, J.-C. Gros, C. Maurin, J. Severac, C. Siméon, C. Viguier, Utilisation de la télédétection infrarouge et des mesures isotopiques – tritium et oxygène 18 – pour l'étude des résurgences d'eau douce le long du littoral aquitain, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. D* 274 (1972) 2841–2844.
- [25] P.-C. Lévêque, Résultats de l'utilisation de la télédétection de l'oxygène 18 et du tritium pour l'étude de la marge littorale d'aquitaine, *Bull. Inst. Geol. Bassin d'Aquitaine* 14 (1973) 241–254.
- [26] J.E. Nash, J.V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *J. Hydrol.* 10 (3) (1970) 282–290.
- [27] L. Potié, Ressources en eau des zones côtières, Syndicat de recherche de Port-Miou, Marseille, 1979, pp. 1–4.
- [28] G. Rovereto, Polla sottomarina di Capo Garavan (presso La Mortola), rapport inédit, 1934.
- [29] A. Stefanon, F. Cotecchia, Prime notizie sulle caratteristiche di efflusso e sulle modalità di investigazione delle sorgenti subacquee affini di una loro captazione, *La Ricerca Scientifica* 58 (1969) 165–195.
- [30] A. Stefanon, Capture and exploration of submarine spring, *Oceanol. Int., Brighton England* 72 (1972) 427–430.
- [31] A. Stefanon, Evaluation and capture of submarine springs, in : 2^o Convegno Internazionale Sulle Acque Sotterranee, Palermo, Italie, 1973 (13 p.).
- [32] A. Stefanon, Ulteriori osservazioni sulla Polla di Rovereto e sulle altre sorgenti sottomarine della Mortola (Riviera di Ponente), in : 2^o Convegno Internazionale Sulle Acque Sotterranee, Palermo, Italie, 1973 (11 p.).
- [33] VENSIM Software. Ventana Systems, Inc. <http://www.vensim.com>