



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 523–533



Géosciences de surface

# 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

Bernard Blavoux <sup>a,\*</sup>, Éric Gilli <sup>b</sup>, Claude Rousset <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire d'hydrogéologie, UFR Sciences, université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 33, rue Louis-Pasteur, 84000 Avignon, France

<sup>b</sup> Département de géographie, université Paris-8, Vincennes–Saint-Denis, 2, rue de la Liberté, 93526 Saint-Denis cedex, France

<sup>c</sup> Laboratoire de chimie et environnement, université de Provence, Marseille-1, case 29, 3, place Victor-Hugo, 13331 Marseille cedex 3, France

Reçu le 6 mars 2003 ; accepté le 28 octobre 2003

Disponible sur Internet le 17 avril 2004

Présenté par Ghislain de Marsily

## Résumé

La salinité des eaux de la source sous-marine de Port-Miou a été partiellement attribuée à un lessivage d'évaporites continentales ; or, de récentes analyses chimiques et isotopiques montrent qu'il s'agit en fait d'un simple mélange d'eau de mer et d'eau douce. La contamination, encore perceptible à deux kilomètres de l'entrée et à plus de 147 m de profondeur, impose de réfléchir à une géométrie générale du système permettant le mélange eau douce/eau de mer à grande profondeur. Les mesures de débit dans la grotte traduisent un excédent d'eau à Port-Miou par rapport à son bassin théorique, tandis qu'un bilan sommaire des aquifères montre un déficit d'émergences en Provence. Port-Miou pourrait donc drainer une grande partie de la basse Provence calcaire. Ceci pourrait s'expliquer par la mise en place du système karstique au Messinien, avec un niveau eustatique très abaissé, permettant l'existence d'un important gradient hydraulique entre la basse Provence et le littoral. **Pour citer cet article : B. Blavoux et al., C. R. Geoscience 336 (2004).**

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

## Abstract

**Watershed and origin of the salinity of the karstic submarine spring of Port-Miou** (Marseille–Cassis–Bouches–du-Rhône). The salinity of the karstic submarine spring of Port-Miou has sometimes been attributed to the leaching of continental evaporites. Our recent chemical and isotopic analyses indicate a simple mixing between fresh karstic water and seawater. In the main gallery, the contamination by seawater, still present up to 2.2 km from the entrance at a depth of 147 m below the sea level, forces us to think about a general geometry that allows mixing of waters, at a great depth, in the karstic system. The measurements of the discharge of the spring indicate an excess of water compared with its supposed watershed, whereas a succinct evaluation of the aquifers of the Lower Provence indicates a deficit of discharge. Consequently, it seems possible that parts of the calcareous areas of the Lower Provence feed the springs of Port-Miou with a total catchment area of 1200 km<sup>2</sup>. This deep and large karstic system was probably installed during the Messinian period, when the important lowering of the level of

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [bernard.blavoux@univ-avignon.fr](mailto:bernard.blavoux@univ-avignon.fr) (B. Blavoux).

the Mediterranean Sea provoked an important gradient between Provence and the seashore. *To cite this article: B. Blavoux et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

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

*Mots-clés* : source sous-marine ; Port-Miou ; salinité ; impluvium ; karst de basse Provence ; creusement messinien ; France

*Keywords*: Submarine spring; Port-Miou; salinity; catchment area; Lower-Provence karst; France

## Abridged English version

### 1. Presentation: facts and problems

The submarine karstic spring of Port-Miou flows from a large submarine gallery near Cassis (Fig. 1). Some other springs like the Bestouan, are linked to it. The cave has been explored since the 1950s. In 1993, an ultimate point situated at 2200 m from the entrance and 147 m below the sea level was reached. This final part is an enigmatic vertical pit and the cave continues further, but these length and depth represent together a limit for a safe human exploration.

The water is brackish and not good for water supply. The salinity, between 10 and 20 g l<sup>-1</sup>, was first considered as entering from the submarine entrance of the cave and two dams were successively built to cure this contamination. The salinity fell to a minimal value of 3 g l<sup>-1</sup>, but never below. The discharge and salinity measurements proved their inverse connection.

Currently, the floodgates of the dam remain open and the salinity reaches 6 g l<sup>-1</sup> in the lowest water flow, at the end of the explored gallery. During the 1970s, before and immediately after the construction of the dams, the flow was measured between 3 and 160 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> with an average of 7 to 8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. The variations are related to the local rainfalls, but the complexity of this relationship emphasises the great inertia of the system. The salinity was first attributed to the seawater contribution, estimated between 15 and 20%. But as the freshwater part might contain about 30 mg l<sup>-1</sup> of Cl<sup>-</sup> and 100 mg l<sup>-1</sup> of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, the salts were partly considered as dissolved from Triassic or Oligocene evaporites. However, many Mediterranean seaside springs also produce briny water and this fact prompted us to undertake further investigations.

### 2. New results and the origin of the salinity

Some water samples were taken during a low flow period, at different depths, upstream from the dam, with its floodgates open, allowing the seawater to enter. The chemical analysis of the major elements, of the Br<sup>-</sup>, and the stable isotopes of the water molecule (<sup>2</sup>H and <sup>18</sup>O) show a very clear stratification with an upper level, low in salinity, approximately 2 m thick, and a homogenous more mineralised water lying at a depth of between 3 and 12 m. In Table 1, one can compare these samples with fresh karstic water from the Coulin borehole, with the water from some springs of Provence, and also with the seawater of the Cassis area. Figs. 2–4 only concern the sea, the two main levels in Port-Miou and the Coulin borehole.

As depicted in Table 2, we can evaluate the proportion of the marine water in an assumed mixing with fresh karstic water. Using the ratios of Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup>, we can conclude that the spring water contains 13 to 15% of seawater in the upper level and more than 30% at the bottom of the gallery. We can provide two origins for the contribution of the sea water: the first one very far upstream into the karst, giving equal values at -147 and 2200 m from the entrance of the cave and in the upper level of the gallery, the second one in the downstream part of the cave, by a direct intrusion from the open sea.

We have no indication of a participation of evaporites to the mineralization; moreover, the Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> ratios of all the samples fluctuate around the specific value of the seawater of 1.53, whilst the evaporites value always falls between 0.7 and 1.2.

When we consider the ratios of <sup>18</sup>O and <sup>2</sup>H on the one hand and of the HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> on the other hand, we have to envisage a contribution of lower karstic areas to the freshwater flow between Coulin and Port-Miou. A precipitation of calcite caused by mixing of fresh and marine water can explain the low rates of carbonate and calcium in the deeper part of the gallery.

### 3. New hypothesis concerning the functioning of the Port-Miou system

Regarding the karstic areas in the proximity, we know since 1986 that the block of the Sainte-Baume loses 50% of its infiltrated water and a comparison with the results of past dye tests allows us to consider the drainage of the water towards Port-Miou along an Urgonian limestone belt. The drilling of some boreholes has confirmed the presence of an important groundwater flow, with a regular gradient of 6‰ following an east–west, then NNE–SS(E) (W) structural direction (Fig. 5). The regional stratigraphy and the structure of the Urgonian belt do not give credibility to a contact between karstic water and evaporites.

The entirety of the chemical results indicates a mixing of the sea and the karstic waters upstream from the limits of exploration. However, some of these results imply a contribution of other karsts complementing the region of the Sainte-Baume.

As we consider an average discharge of  $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  of freshwater in the Port-Miou system, a regional study, including the rainfall, the infiltration, the discharge of springs and rivers, suggests extending the catchment area to  $1200 \text{ km}^2$ . The isotopic study indicates an average altitude of 480 m that can include an important part of the western Lower Provence.

### 4. Conclusion

Our multi-disciplinary study allows us to consider that the Port-Miou karstic system is lying on a large part of the calcareous lower Provence. The seawater is introduced very far into the karst and mixed with the freshwater system at a depth of more than 147 m below sea level. It may be suggested that the very important

excavation of the system has its origin in the Messinian lowering of the Mediterranean Sea level. With regard to this viewpoint, it may be possible that the submarine blind canyon of Cassidaigne, 6 km south of Cassis, has been cut by the Messinian palaeoriver of Port-Miou a few hundred metres below the present sea level.

## 1. Présentation

### 1.1. Description et localisation

Située dans la calanque de Port-Miou, à l'ouest de Cassis, la source marine de Port-Miou naît d'une galerie noyée à 6 m sous le niveau de la mer ; un fort courant d'eau douce, visible lorsque la mer est calme, s'en échappe (Fig. 1). Elle fait partie d'un groupe de sources littorales et sous-marines, dont celle du Bestouan.

Les premières descriptions de la source sont attribuées à Marsigli en 1725 [16], puis à Martel [18], mais l'exploration de la galerie noyée n'a débuté que dans les années 1950, dès l'invention du scaphandre autonome. Un premier plan fut dressé par l'OFRS en 1957 [5]. Par la suite, au début des années 70, d'importants moyens ont été mis en œuvre dans le cadre des travaux du Syndicat des recherches de Port-Miou (SRPM – groupement de la Société des eaux de Marseille et du Bureau des recherches géologiques et minières), destinés à mettre en place un captage expérimental. Une importante galerie noyée, atteignant 20 m de diamètre, a pu être reconnue et levée sur plusieurs centaines de mètres, sans atteindre le fond de cette grotte. À la suite de ces travaux, l'exploration s'est poursuivie en fonction des progrès de la plongée spéléologique et, en 1993, un point ultime à 147 m de profondeur a été at-

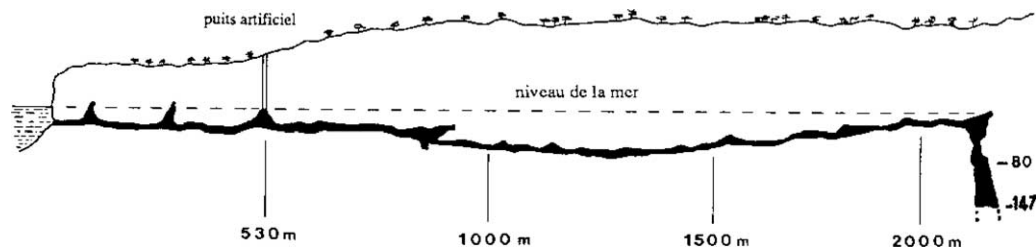


Fig. 1. Coupe nord-sud de la source sous-marine de Port-Miou à Marseille-Cassis.

Fig. 1. North–south cross section of the submarine spring of Port-Miou (Marseille-Cassis).

teint à 2200 m de l'entrée [8], dans un énigmatique puits vertical; néanmoins, le conduit se poursuit au-delà. On atteint ici les limites raisonnables de l'exploration humaine et la suite imposera vraisemblablement l'utilisation d'un engin téléguidé.

### 1.2. Salinité de la source

L'eau de Port-Miou est abondante, mais saumâtre, ce qui interdit son utilisation directe pour l'alimentation en eau potable. La présence d'un flux d'eau de mer entrant en partie basse de la galerie, qui pouvait expliquer la salinité de la source, a justifié la construction d'un barrage sous-marin destiné à empêcher le mélange des deux eaux.

Une première tentative, commencée en 1972 à l'aide d'un ouvrage en béton allégé construit directement sur les sédiments karstiques, a permis de limiter partiellement l'intrusion marine. La salinité de l'eau est passée de 10 à 6 g l<sup>-1</sup> en surface et de 20 à 6 g l<sup>-1</sup> au fond. Une deuxième tentative, en 1975–1976, surélevant le barrage, a créé une mise en charge effective de 3 m. Ceci a permis de séparer efficacement les deux milieux, mais en amont du barrage, l'eau conservant cependant une salinité résiduelle proche de 3 g l<sup>-1</sup> [26].

L'examen des données collectées par le SRPM montre que la salinité varie en fonction inverse du débit de la source, sans jamais descendre au-dessous du seuil de 2,5 g l<sup>-1</sup>. L'absence de zonage dans le conduit et l'homogénéité des valeurs à l'étiage laissent alors supposer que le mélange a une origine lointaine [21].

À l'heure actuelle, le suivi a été abandonné et le barrage ne provoque plus de mise en charge, car ses vannes profondes restent ouvertes. Les explorations spéléologiques de 1993 ont montré qu'à l'étiage, au fond de la grotte, à 147 m de profondeur, une salinité de 6 g l<sup>-1</sup> est toujours présente [8].

### 1.3. Données hydrométriques

Durant les travaux de construction du barrage, entre 1972 et 1973, la source a fait l'objet d'un suivi. Le débit mesuré par courantomètres sur des sections connues de la galerie noyée de Port-Miou a été estimé entre 3 et 160 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, avec un débit moyen d'environ 7 à 8 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> [12,21].

Des essais de corrélation avec la pluie à Cassis et à Cuges montrent que la pluviosité et le débit des sources de Cassis sont liés. Aucune corrélation simple n'a cependant pu être mise en évidence, ce qui traduit un système à grande inertie [3,17].

### 1.4. Hypothèses antérieures sur l'origine de la salinité

À l'époque des travaux, la SEM a mené une réflexion sur l'origine de la salinité résiduelle à Port-Miou [25]. La participation de l'eau de mer au débit de la source a été estimée à 15–20%. Une reconstitution de la composition de l'eau avant mélange avec l'eau de mer indiquait des teneurs faibles en chlorures (Cl<sup>-</sup> = 30 mg l<sup>-1</sup>) et raisonnables en sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = 100 mg l<sup>-1</sup>). Postérieurement, une étude isotopique sur les sulfates [27] a conclu qu'ils avaient en partie une origine continentale, liée au lessivage des terrains du Trias ou de l'Oligocène. Il semble que cette explication ait été amplifiée et étendue aux chlorures pour expliquer la salinité résiduelle, limitant ainsi l'intérêt des futures expérimentations à Port-Miou. Ce problème de salinité résiduelle est commun à de nombreuses émergences karstiques littorales ou sous-marines du pourtour méditerranéen et différentes explications sont actuellement proposées pour leur fonctionnement [1,2,10]. C'est dans le cadre de cette nouvelle réflexion que notre étude préliminaire a été menée à Port-Miou.

## 2. Données nouvelles et origine de la salinité

### 2.1. Prélèvements et analyses

En mars 2001, en étiage d'hiver, de l'eau a été prélevée en plongée à différentes profondeurs dans la source de Port-Miou en amont du barrage, les vannes profondes de ce dernier étant ouvertes et permettant l'intrusion de l'eau de mer.

Les anions et cations majeurs, le brome et les isotopes stables de la molécule d'eau (oxygène 18 et deutérium) ont été analysés au laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon sur les huit échantillons du profil vertical en galerie. Les résultats montrent une stratification très nette des eaux. Une couche d'eau saumâtre

Tableau 1

Analyses chimiques des eaux de Port-Miou, de la mer, du forage de Coulin et de diverses sources karstiques de Provence

Table 1

Chemical analysis of the water of Port-Miou, the sea, Coulin borehole and some karstic springs of Provence

Lieux	CE [ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ]	Cl <sup>-</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	Na <sup>+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	Mg <sup>++</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	Ca <sup>++</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	K <sup>+</sup> [mg l <sup>-1</sup> ]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰ SMOW]	$\delta^2\text{H}$ [‰ SMOW]	Br <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup> [mequiv × 10 <sup>3</sup> ]
MER CASSIS	55 700	23 137	2764	154	11 480	1328	444	565,0	+1,33	+8,0	1,58
FORAGE COULIN	540	14	43	281	6,7	22,3	70,6	0,8	-7,56	-45,3	1,36
Port-Miou surface	8580	3077	352	375	1688	194	191	70,0	-5,57	-33,7	1,57
Port-Miou -2m	10 650	3754	470	324	1671	203	173	85,0	-5,51	-33,9	1,42
Port-Miou -3m	21 300	7806	975	254	3722	411	233	186,0	-4,11		1,44
Port-Miou -4m	21 300	7688	1039	255	3785	412	232	185,0	-4,19		1,44
Port-Miou -6m	21 200	7725	937	257	4073	416	267	157,0	-4,31		1,63
Port-Miou -8m	21 300	7667	948	254	4121	445	236	186,0	-4,25		1,72
Port-Miou -10m	21 300	7508	922	257	3748	430	239	184,0	-4,41		1,61
Port-Miou -12m	21 400	7544	803	255	3688	431	253	183,0	-4,44	-24,9	1,83
CALISSANE	1890	387,6	85,7	347	238	19	98	27,5	-7,39		1,60
BEAUPRE		5,2	7,2	274	2,7	22,8	55	0,0	-7,23	-42,7	
LAUNES		9	12,9	227	4,9	20,6	48	0,0			
RABY		5,3	22	284	2,6	21,8	67,6	0,0			

Tableau 2

Pourcentage d'eau de mer dans les eaux de Port-Miou à différents niveaux de la galerie

Table 2

Percentage of seawater in Port-Miou at different levels of the gallery

	% d'eau de mer dans le mélange						<sup>18</sup> O	<sup>2</sup> H
	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Moyenne		
P.M. surf.	13,3	14,7	11,4	13,2	12,2	13,0	22,4	21,8
P.M. -2 m	16,2	14,5	16,2	13,9	14,9	15,1	23,1	21,4
P.M. -3 à -12 (m) (moyenne de 6 échantillons)	33,1	33,6	32,9	30,8	31,8	32,4	35,1	38,3

de surface, épaisse d'un peu plus de 2 m et de conductivité proche de 10 000  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (6 g l<sup>-1</sup> de minéralisation totale), repose sur une tranche d'eau homogène de 3 à 12 m de profondeur et plus minéralisée, avec une conductivité de 21 300  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (13,5 g de minéralisation totale). Leurs compositions ont été comparées (Tableau 1), d'une part, à celle d'une eau prélevée le 6 avril 2001 dans le forage de Coulin, à Gémenos, à l'altitude de 140 m (niveau piézométrique à 70 m NGF) sur un réseau karstique profond en relation avec la source de Port-Miou et, d'autre part, à celle de l'eau de la Méditerranée, prélevée près de Cassis, loin des venues d'eau douce. Quelques analyses de sources karstiques du même environnement sont fournies en complément.

## 2.2. Interprétation des résultats

L'hypothèse a été faite que ces eaux saumâtres pouvaient résulter d'un simple mélange entre l'eau de mer et l'eau douce du karst, représentée par le forage de Gémenos. Le calcul des proportions de chacune des composantes dans le mélange à l'aide de tous les éléments supposés conservatifs (Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>) donne les mêmes résultats pour tous les éléments utilisés et fournit, pour la tranche d'eau superficielle, une participation de 13 % d'eau de mer en surface et de 15 % à 2 m de profondeur, alors qu'elle est de près de 33 % pour toute la tranche inférieure homogène de 3 m de profondeur jusqu'au fond (Tableau 2). Sur les diagrammes sodium-chlorures et

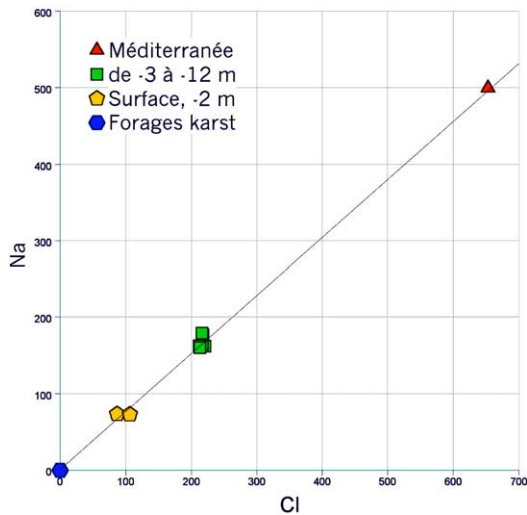


Fig. 2. Relation Na/Cl, en mequiv l<sup>-1</sup>, entre les différentes eaux.

Fig. 2. Na/Cl ratio (mequiv l<sup>-1</sup>) between the different waters.

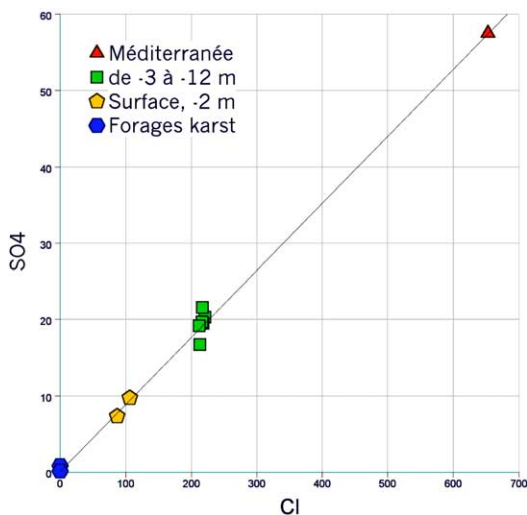


Fig. 3. Relation SO<sub>4</sub>/Cl, en mequiv l<sup>-1</sup>, entre les différentes eaux.

Fig. 3. SO<sub>4</sub>/Cl ratio between the different waters.

sulfates–chlorures (Figs. 2 et 3), la réalité des mélanges entre les mêmes composantes est bien démontrée pour les deux tranches d'eau.

Si une partie des mélanges dans la couche inférieure peut s'expliquer par un flux d'eau de mer pénétrant par la galerie horizontale, l'hypothèse selon laquelle la couche supérieure (6 g l<sup>-1</sup> de minéralisation) est représentative des écoulements remontant par le

conduit vertical semble raisonnable, d'autant plus que l'exploration spéléologique a montré qu'une salinité de 6 g l<sup>-1</sup> y était toujours présente, à l'étiage, à 147 m de profondeur. Cette salinité résiduelle résulte aussi du mélange d'une eau des calcaires, assimilable à celle du forage de Gémenos avec l'eau de mer, mais ce premier mélange se produit à grande profondeur dans le réseau karstique. En amont, la composante eau douce continentale est donc une eau bicarbonatée calcique, dont les teneurs en chlorures (14 mg l<sup>-1</sup>) sont très faibles et héritées des pluies et les teneurs en sulfates à peine plus élevées (< 40 mg l<sup>-1</sup>). En aucun cas ces eaux ne sont marquées, comme on a pu le supposer, par un contact avec des évaporites. Le rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> (en 10<sup>3</sup> mequiv l<sup>-1</sup>) de tous les échantillons oscille autour de la valeur de 1,53, caractéristique de l'eau de mer, et exclut tout apport de Cl<sup>-</sup> par des évaporites, pour lesquelles le rapport serait compris entre 0,7 et 1,2 [9].

Le calcul des fractions d'eau marine participant au mélange à partir des isotopes stables donne des valeurs, certes du même ordre de grandeur que celles obtenues avec les éléments chimiques, mais proportionnellement plus fortes avec les deux isotopes et pour tous les échantillons (Tableau 2). En fixant les proportions fournies par l'ensemble des éléments chimiques, on calcule en retour que les teneurs isotopiques de la composante continentale s'élèvent à -7,0 δ<sup>18</sup>O‰ et -40,8 δ<sup>2</sup>H‰, contre respectivement -7,56 et -45,4 pour le forage Coulin. Cette différence implique un apport d'eau complémentaire au réseau karstique en aval du forage, apport dont le contenu isotopique enrichi atteste un impluvium d'altitude plus basse. Sur un diagramme <sup>18</sup>O–Cl<sup>-</sup> (Fig. 4) on vérifie que la meilleure droite de mélange recoupe l'axe des ordonnées (Cl<sup>-</sup> à quelques mg l<sup>-1</sup>) pour un δ<sup>18</sup>O de -7,0‰. Comme la teneur en hydrogénocarbonate de la couche de surface de la galerie est supérieure à celle des deux composantes du mélange, la concentration de la composante d'eau douce, et donc de cet apport complémentaire à l'écoulement du réseau karstique, doit aussi être plus forte. Dans l'hypothèse où cet élément serait conservatif, on calcule, comme précédemment avec les isotopes stables, une concentration minimum en hydrogénocarbonate de 385 mg l<sup>-1</sup> pour la composante d'eau douce qui s'apparente à celle rencontrée communément dans les aquifères calcaires fissurés ou dans les aquifères karstiques sous couverture, alors que les exurgences karstiques régionales ont des concentra-

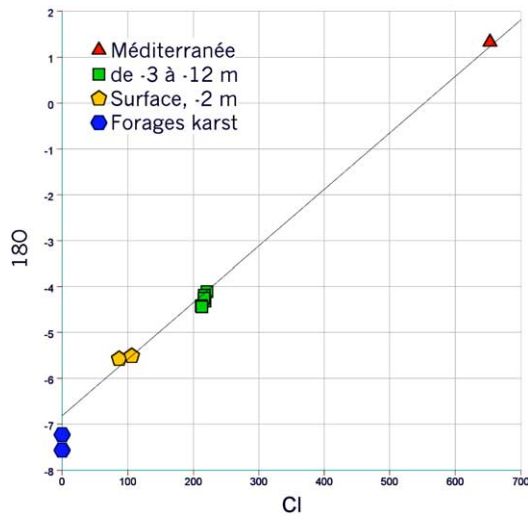


Fig. 4. Relation  $^{18}\text{O}$  ( $\delta\text{‰ SMOW}$ )/Cl, en  $\text{mequiv l}^{-1}$ , entre les différentes eaux.

Fig. 4.  $^{18}\text{O}$ /Cl ratio between the different waters.

tions en  $\text{HCO}_3^-$  qui ne dépassent pas  $280 \text{ mg l}^{-1}$ . On remarquera enfin qu'en retenant cette concentration minimum de  $385 \text{ mg l}^{-1}$  pour la composante d'eau douce, le calcul de la teneur en hydrogencarbonate de la couche inférieure d'eau saumâtre de la galerie, à l'aide des proportions fournies par l'ensemble des éléments conservatifs, donne une concentration homogène de  $310 \text{ mg l}^{-1}$ , à comparer aux  $255 \text{ mg l}^{-1}$  mesurés. Cette perte d'hydrogencarbonate impliquerait la précipitation de calcite lorsque se produit le mélange de l'eau du conduit vertical avec l'eau de mer pénétrant dans la couche inférieure de la galerie. Un échantillon de la boue légère qui recouvre le sol de la galerie noyée a été prélevé en amont du barrage. Un essai à l'acide chlorhydrique révèle la présence de carbonates. Il s'agit vraisemblablement de calcite de précipitation.

### 3. Nouvelles hypothèses sur le fonctionnement du système de Port-Miou

#### 3.1. Relations avec les karsts proches

Depuis les travaux de Coulier [6], le très important déficit d'écoulement de surface du massif de la Sainte-Baume, certainement supérieur à 50 % de la fonction

d'entrée du karst, est démontré. Ce déficit doit être rapproché du fait que des colorations anciennes [23] montrent une alimentation des sources de Cassis par la bande urgonienne qui les unit au bord sud de la Sainte-Baume. Autour de ce massif, les nombreux systèmes annexes nourrissent des sources perchées. De fait, la complexité structurale du secteur se prête à la conservation de structures de stockage des eaux, alors même que les karsts s'y développent sans doute depuis la fin du Miocène. La partie est du massif, l'Agnis, alimente le Gapeau, qui descend vers Hyères et qui reçoit des eaux d'autres karsts, comme ceux de Cuers ou de Siou Blanc. La ligne de partage des eaux, à l'est et au sud-est du bassin de Port-Miou, n'est pas connue avec certitude.

Deux expériences de coloration du BRGM, effectuées en saison humide, ont depuis longtemps prouvé les relations Gémenos sud–Port-Miou [3]. Celle de l'embut de Coulin, en 1965, dans la zone absorbant les eaux de la nappe alluviale à l'est d'Aubagne [20], a donné un transfert à Port-Miou en 42 j ( $12 \text{ m h}^{-1}$ ). Celle du tunnel du Mussuguet (Fig. 5) en 1966, en aval et dans une partie plus active du karst, a été positive en 7 j ( $32 \text{ m h}^{-1}$ ).

Bien qu'un essai de traçage du groupe spéléologique de Provence [19] sur l'embut aval du poljé de Cuges n'ait rien donné en six mois de surveillance, cette grande structure karsto-tectonique est certainement drainée vers Port-Miou. Un déversement vers le sud est peu probable, l'Urgonien s'y révélant indemne de karstification, malgré les nombreux essais de foration. En 1981, un forage implanté à Cuges ouest (Puyricard) révéla des circulations actives, avec une surface piézométrique moyenne à 90 m NGF. D'autres forages furent ensuite implantés notamment à Coulin entre Cuges et l'embut de Coulin, avec une surface piézométrique vers 70 m NGF. Ceci traduit une inclinaison régulière de la surface piézométrique de  $6 \text{ m km}^{-1}$  de Cuges vers Port-Miou selon les directions est–ouest puis NNE–SSW qui correspondent à la structure (Fig. 6).

Les forts débits reconnus sur les forages de Puyricard et de Coulins et la constance du gradient hydraulique confirment l'idée que les drains principaux vers Port-Miou longent la zone faillée est–ouest de Cuges jusqu'à Coulin. Ils sont suralimentés par le déversement profond des karsts étagés de la Ste Baume, dont celui qui nourrit la source de St Pons ( $100 \text{ à } 200 \text{ l s}^{-1}$ ),

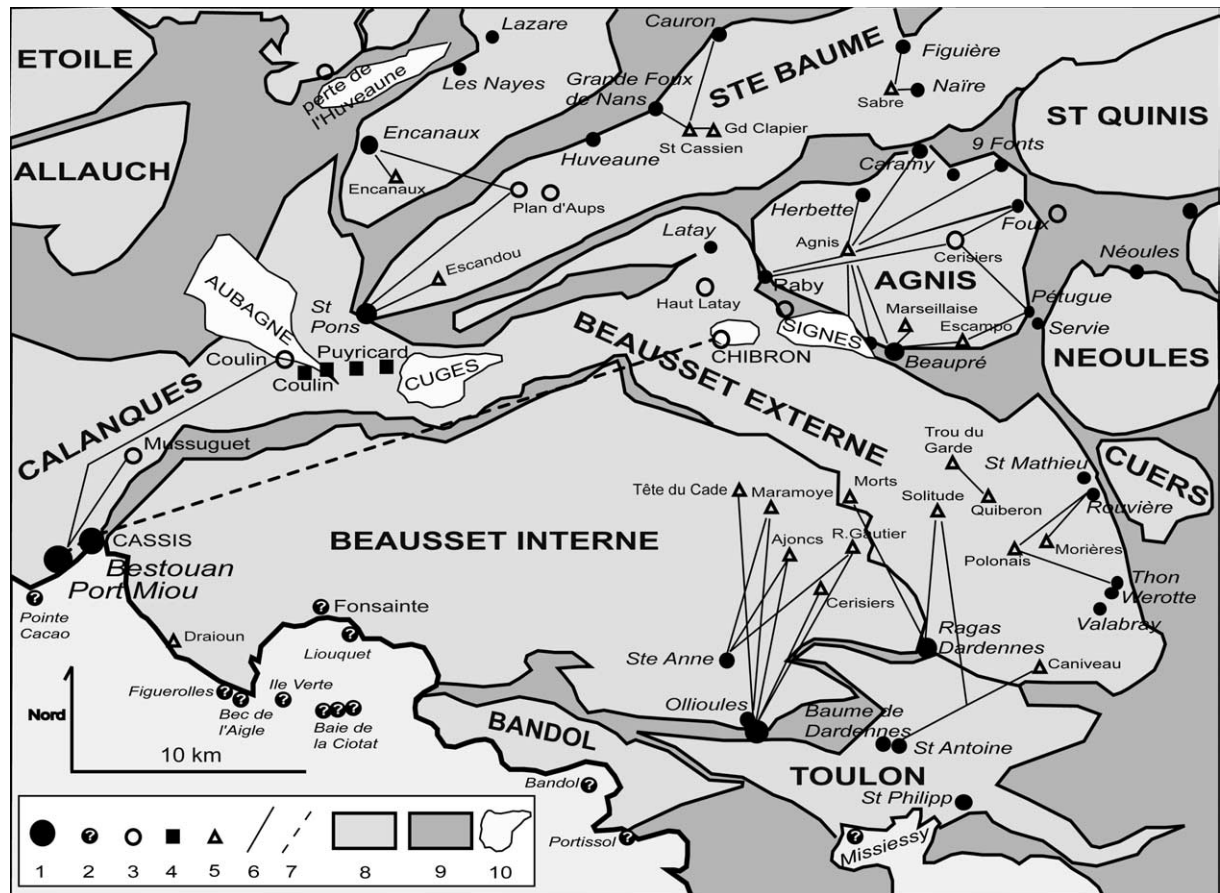


Fig. 5. Principales unités karstiques et localisation des indices. D'après [12] : 1, source ; 2, source supposée ; 3, perte ; 4, forage ; 5, grotte, gouffre ; 6, traçage ; 7, traçage douteux ; 8, unité karstique ; 9, autres terrains ; 10, poljé.

Fig. 5. Main karstic units and location of signs. From [12]. 1, spring ; 2, source supposed spring ; 3, sink hole ; 4, wells ; 5, cave ; 6, dye test ; 7, doubtful dye test ; 8, karstic unit ; 9, other formations ; 10, polje.

exutoire de système annexe et celui du Vèze, révélé par des suintements saisonniers et par un forage artésien [24].

La structure du massif calcaire intermédiaire rend peu probable un contact des eaux du karst avec des évaporites triasiques ou oligocènes.

### 3.2. Indications de la chimie

Pour tous les éléments majeurs, excepté les hydrogénocarbonates et le calcium, la minéralisation des eaux de la galerie de Port-Miou peut s'expliquer par un simple mélange entre l'eau de mer et l'eau du karst, représentée par le forage de Coulin. Un premier mé-

lange à raison de 15 % d'eau de mer s'effectue au-delà de 147 m de profondeur, avant la remontée par le conduit vertical, et s'écoule sans autre perturbation dans la couche supérieure de galerie noyée. Le barrage étant actuellement ouvert, l'eau de mer pénètre dans la tranche inférieure de la galerie et un mélange complémentaire à raison de 33 % s'opère de façon homogène entre 3 et 12 m de profondeur. Les chlorures et les sulfates présents dans l'eau de Port-Miou ont bien une origine essentiellement marine.

Les analyses isotopiques suggèrent un apport complémentaire d'eau douce issue d'un impluvium plus bas que celui du forage de Coulin, tandis que les teneurs en hydrogénocarbonates du mélange impliquent



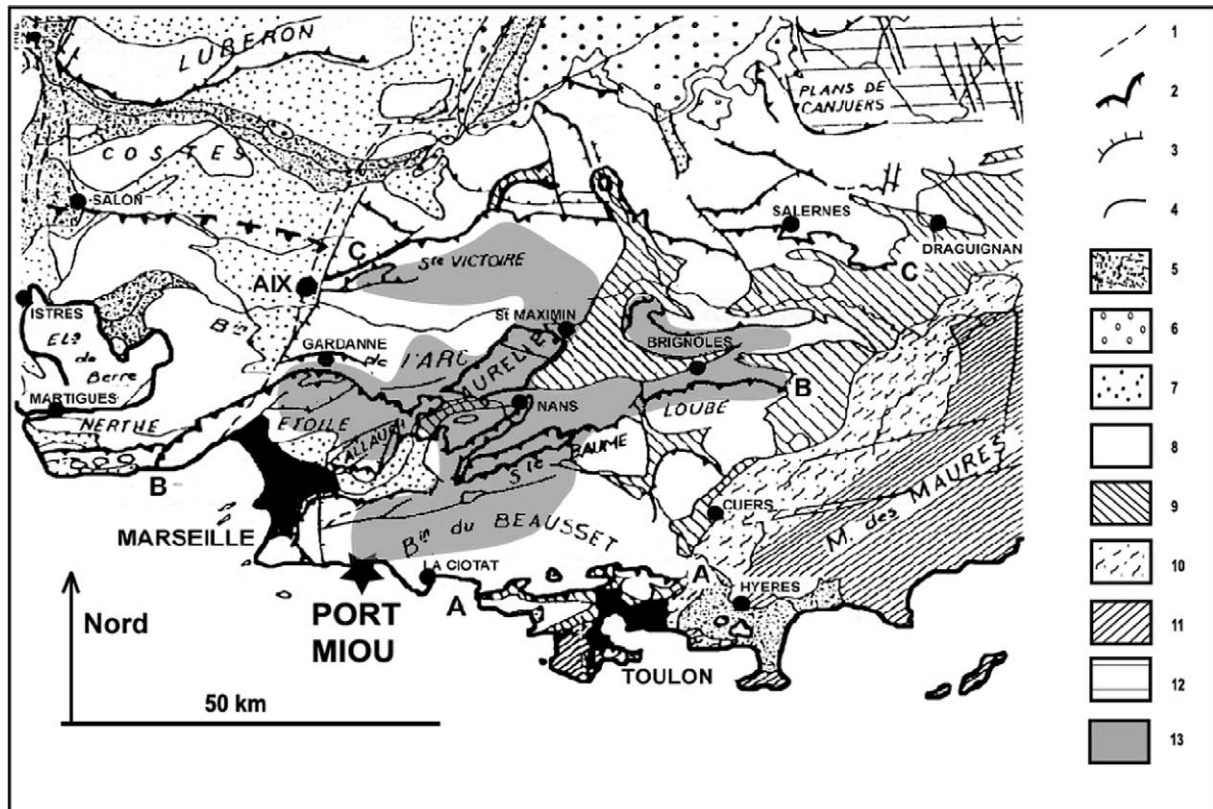


Fig. 6. Bassin hypothétique de l'aquifère de Port-Miou sur un schéma structural de la basse Provence, d'après [15], modifié : 1, principales failles crustales ; 2, chevauchements importants (A, B et C : front d'érosion des principales nappes) ; 3, autres failles ; 4, contacts normaux ; 5, Quaternaire ; 6, Mio-Pliocène continental ; 7, Miocène marin et Oligocène lacustre ; 8, Crétacé et Jurassique calcaires ; 9, Trias (calcaires et évaporites) ; 10, Permien (grès et pélites) ; 11, Carbonifère et Hercynien ; 12, chaînes subalpines méridionales ; 13, bassin d'alimentation supposé.

Fig. 6. The possible catchment area of Port-Miou drawn on the structural framework of the lower Provence, from [15] modified. 1, main crustal faults ; 2, important overthrusts (A, B and C : erosion front of the main nappes) ; 3, other faults ; 4, normal contacts ; 5, Quaternary deposits ; 6, continental Mio-Pliocene deposits ; 7, marine Miocene and lacustrine Oligocene ; 8, Cretaceous and Jurassic limestones ; 9, Triassic formations (calcareous and evaporitic) ; 10, Permian red sandstones and shales ; 11, Carboniferous and Hercynian basement ; 12, southern subalpine units ; 13, possible catchment area.

que cet apport soit plus concentré, avec donc une minéralisation qui s'apparente à celle d'aquifères calcaires sous couverture. La composante d'eau douce ne peut se résumer à la seule contribution d'un réseau karstique, comme celui intercepté au forage de Gémenos.

### 3.3. Essai de bilan et hypothèses sur l'impluvium

Si l'on retient l'existence d'un débit moyen de 7 à  $8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  drainant l'aquifère de Port-Miou–Bestouan, l'apport d'eau douce au système peut être estimé à

$6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , compte tenu d'un mélange avec l'eau de mer à raison de 15 %.

La pluviométrie de la basse Provence montre des valeurs comprises entre 350 et 600 mm pour les Bouches-du-Rhône et entre 700 et 900 mm pour le Var. En s'appuyant sur des bilans réalisés sur des bassins bien circonscrits, plateau d'Agnis [11] et massif de Néoules [7], qui donnent des modules d'infiltration de  $10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  dans des contextes équivalents, on peut retenir un module compris entre 6 et  $10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  pour les affleurements calcaires de ce secteur, soit une moyenne de  $8 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ .

En retenant une valeur maximale de  $10 \text{ IS}^{-1} \text{ km}^{-2}$ , l'impluvium communément admis de Port-Miou–Bestouan comprenant l'auréole urgonienne du bassin du Beausset, augmentée d'une partie de la Sainte-Baume, couvre une superficie de  $200 \text{ km}^2$  environ [14], qui peut fournir au maximum  $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

L'excédent de  $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  à Port-Miou impose la recherche d'un bassin supplémentaire d'au minimum  $500 \text{ km}^2$ , vraisemblablement beaucoup plus, puisque les superficies nécessaires doivent déjà comporter un écoulement de surface. Par exemple, les débits des sources ou des prélèvements connus entre le bassin du Beausset et la Sainte-Victoire (sources de l'Argens, puits de l'Arc, etc.) atteignent 3 à  $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pour une surface d'affleurements de calcaires du Jurassique et du Crétacé d'environ  $1000 \text{ km}^2$ , ce qui ne représente que la moitié de l'infiltration annuelle, qui devrait théoriquement produire environ  $8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

On dispose, pour situer l'impluvium de Port-Miou, d'un autre paramètre fourni par la teneur en oxygène 18 de la composante eau douce du système. Le  $\delta^{18}\text{O}$  de cet apport, qui a été estimé à  $-7\text{‰}$ , indique un impluvium à l'altitude moyenne de  $480 \pm 50 \text{ m}$ , compte tenu des rares valeurs dont on dispose sur la basse Provence et des gradients isotopiques avec l'altitude de  $0,33\text{‰}/100 \text{ m}$  définis sur le bassin de Fuveau [4].

La teneur en  $^{18}\text{O}$  donnerait donc une indication proche de celle de l'essai de bilan. Au-delà de son bassin de  $200 \text{ km}^2$  communément accepté, l'impluvium total de Port-Miou–Bestouan, estimé à près de  $1200 \text{ km}^2$ , pourrait au moins s'inscrire dans un périmètre remontant vers le nord, dans le bassin de l'Arc, jusqu'à la Sainte-Victoire et s'étendant vers l'est, en direction de Brignoles (Fig. 6).

#### 4. Conclusion

Les données qui précèdent montrent, grâce à une approche pluridisciplinaire, que la source de Port-Miou correspond à un vaste système complexe, qui draine probablement une grande partie de la basse Provence calcaire. L'eau de cet aquifère est contaminée par la mer à plus de  $2 \text{ km}$  de la côte et à plus de  $147 \text{ m}$  de profondeur, soit plus bas que les niveaux des abaissés marins glacio-eustatiques du Quaternaire. Or, compte tenu des faibles gradients hydrauliques actuels

et de la présence de drains à grande profondeur à Port-Miou, la géométrie, la mise en place et le fonctionnement d'un tel système ne peuvent s'expliquer que par un héritage messinien [12]. Avec un niveau marin abaissé de plusieurs centaines de mètres, le système karstique s'est mis en place à une profondeur d'environ  $250 \text{ m}$ , définie par la position du substratum imperméable, puis la transgression marine pliocène a bloqué les écoulements profonds conduisant l'eau à utiliser des conduits hérités. Cette hypothèse est appuyée par la présence en mer,  $6 \text{ km}$  au sud de Port-Miou, de l'énigmatique tête du canyon sous-marin de la Cassidaigne, qui offre l'aspect d'une reculée karstique ceinturée de falaises de plus de  $200 \text{ m}$  de puissance et qui ne se raccorde pas à une vallée de surface. Ce canyon aurait pu être creusé par les eaux du paléofleuve de Port-Miou lors de la régression messinienne [13]. Une hypothèse messinienne est aussi avancée pour expliquer la profondeur des drains explorés à la fontaine de Vaucluse, à  $224 \text{ m}$  sous le niveau de la mer [10,22] ainsi que le fonctionnement de l'Almyros d'Héraklion (Grèce) [1].

#### Remerciements

Les auteurs remercient R. Simler (laboratoire d'hydrogéologie), L. Ercolei (Société des eaux de Marseille), M. Roulph (mairie de Gémenos – forage de Coulin), M. Douchet, (plongeur spéléo), ainsi que C. Dorrian pour la version anglaise.

#### Références

- [1] B. Arfib, Étude des circulations d'eau souterraines en aquifère karstique côtier : observations et modélisations de la source de l'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) 245–254.
- [3] J. Auriol, M. Bonnet, La source sous-marine de Port-Miou (Marseille). Bilan des études au 31–12–71. Examen des problèmes de captage, Rapp. BRGM 72 SGN 028 AME, 1972.
- [4] A. Chalumeau, Fonctionnement hydrogéologique des exploitations de lignite du bassin de Fuveau (Bouches-du-Rhône, France), Thèse, Université de Franche-Comté, Besançon, 2000.

- [5] G. Corroy, C. Gouvenet, J. Chouteau, A. Sivirine, R. Gilet, J. Picard, Les résurgences sous-marines de la région de Cassis, *Bull. Inst. Océanogr. Monaco* 1131 (1958).
- [6] C. Coulier, Hydrogéologie karstique de la Sainte-Baume occidentale (Bouches-du-Rhône-Var, France), Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Géologie, Université Aix-Marseille-1, 1986, 395 p.
- [7] R. Cova, X. Durozoy, Carte hydrogéologique du département du Var au 1/200 000, BRGM, DDA du Var, 1980.
- [8] M. Douchet, L.H. Fage, Port-Miou et le Bestouan, *Spéléo* 12 (1993) 3–6.
- [9] W.M. Edmunds, Bromine geochemistry of British groundwater, *Mineral. Mag.* 60 (1996) 275–284.
- [10] É. Gilli, in: *Eaux et rivières souterraines*, in: *Que Sais-je ?*, vol. 455, PUF, Paris, 1999, p. 128.
- [11] É. Gilli, Étude des conditions d'alimentation et du bassin d'alimentation de la source Beaupré (Signes, Var), Rapport Interne, SSS, Signes, Var, 2000.
- [12] É. Gilli, Compilation d'anciennes mesures de débit à Port-Miou. Apport à l'hydrogéologie de la Provence, in: 7<sup>e</sup> Coll. Hydrogéologie en Pays Calcaire et Milieu Fissuré, Besançon, 20–22 septembre 2000, 2001, pp. 157–160.
- [13] É. Gilli, Étude préalable sur le drainage des karsts littoraux (A, Bouches du Rhône et Var ; B, Corse), Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. 2002, 100 p. ; 37 figs ; 2 pl.
- [14] G. Guieu, J. Ricour, J. Rouire, Découverte géologique de Marseille et de son décor montagneux, Éditions du BRGM, Orléans, 1996, 216 p.
- [15] G. Guieu, C. Rousset, in: *Publ. 26<sup>e</sup> Congrès International*, Paris, 1980, pp. 65–80.
- [16] Comte de Marsigli, *Histoire physique de la mer*, Amsterdam, 1725.
- [17] G. de Marsily, D. Poitral, Relations « pluies-débits » dans la galerie de Port-Miou, Centre d'informatique géologique, École des mines de Paris, Fontainebleau, 1972.
- [18] E.A. Martel, *Nouveau Traité des Eaux Souterraines*, Doin, Paris, 1921.
- [19] R. Monteau, Étude karstique des formations urgoniennes du massif des Calanques au massif du Douard, DEA, Université Aix-Marseille-2, 1971.
- [20] G. Naud, Étude hydrogéologique du bassin d'Aubagne à l'est de l'Huveaune, DEA, Université de Provence, Marseille, 1969.
- [21] L. Potie, SRPM – Syndicat de Recherche de Port-Miou – captage des résurgences sous-marines d'eau douce. Observations sur les effets du barrage expérimental de Port-Miou. Rapport interne, Société des Eaux de Marseille, 74 RT 1001 PM, Marseille, 1974.
- [22] J.-M. Puig, Le système karstique de la fontaine de Vaucluse, Thèse de 3<sup>e</sup> cycle de l'Université d'Avignon, Doc. BRGM n° 180, Éditions du BRGM, Orléans, 1990.
- [23] C. Rousset, Contribution à l'étude des karsts du Sud-Est de la France. Altérations morphologiques et minérales, Thèse, Université de Marseille, 1968, 533 p.
- [24] C. Rousset, Structure tectonique et typologie karstique : le cas des karsts de Vaucluse et de Port-Miou (région Provence-Alpes-Côte d'Azur, SE de la France), in: *Proc. Int. Congr. Speleol.*, vol. 2, 1997, pp. 397–410.
- [25] SRPM – Syndicat de recherche de Port-Miou, État des connaissances au 31 avril 1972 sur l'évolution de la chimie des eaux dans le karst de Port-Miou et du Bestouan, Rapport interne BRGM et Société des eaux de Marseille, 1972.
- [26] SRPM – Syndicat de recherche de Port-Miou, La résurgence d'eau douce sous-marine de Port-Miou, *Chantiers de France* 104 (1978).
- [27] M. Vernet, B. Vernet, Essai de discrimination par méthode isotopique de l'origine des eaux de systèmes karstiques. Application aux karsts continentaux et littoraux de Basse-Provence, Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Géologie, Université Aix-Marseille-1, 1980, 208 p.