

## SUR QUELQUES SOURCES LITTORALES ET SOUS-MARINES AUTOUR DE LA MÉDITERRANÉE

Jean NICOD <sup>(1)</sup>

(1) : Florida 1, 35 Avenue du 24 Avril 1915, 13012 MARSEILLE.

**RÉSUMÉ** : Cette étude rassemble des informations et discussions, d'après de nombreux auteurs, sur diverses sources karstiques littorales, d'eau douce ou saumâtre, et émergences sous-marines, dans leur contexte hydrogéologique, géomorphologique et environnemental. La position par rapport au niveau marin des principales sources est précisée (Tab. I) et on rappelle brièvement leur origine et le fonctionnement des émergences, ainsi que les difficultés de captage, du fait des intrusions d'eau marine. On a particulièrement analysé le fonctionnement de Font Estramar et Font-Dame, sur la bordure de l'étang de Salses, en rapport avec le karst des Corbières, le cas analogue de l'alimentation du Lac Siutghiol sur le littoral de la Dobrodgea, le problème classique des "Moulins de la Mer" d'Argostoli et de l'hydrosystème de l'île de Céphalonie, et d'autres problèmes des karsts littoraux (*covas* de Majorque, *etc.*).

**MOTS-CLÉS** : Karst littoral, paléo-hydrologie, sources littorales, sources sous-marines.

**ABSTRACT** : This study produces some informations and discussions, after numerous authors, on various fresh water ore brackish (*almyros*) karstic coastal springs, and submarine springs (*vrulja*), in their hydrogeological and geomorphological environment. The position of main springs with the present sea level is analysed (tabl. 1), and the genesis and explanation of the brackish and submarine springs is briefly discussed, as well as the difficulties of catching because sea water intrusions. Are particularly showed the connections of Font Estramar and Font-Dame, the springs in the border of Salses lagoon, with the Corbières karstic area, the similar case of supply of the Siutghiol Lake in the Dobrodgea, the classical problem of the "sea mills" of Argostoli and the hydrosystem in the Kephallinia Island, and other problems in some coastal karst (*covas* of Mallorca...).

**KEY-WORDS** : Coastal karst, coastal springs, palaeohydrology, submarine springs.

### I - INTRODUCTION

---

Le long des côtes de la Méditerranée, les sources littorales et sous-marines jaillissent au pied ou à proximité des massifs calcaires. Certaines, reconnues de longue date par les pêcheurs, furent utilisées dès l'Antiquité : une source dans le port de Tyr lors du siège d'Alexandre, un puits romain foré près de l'exurgence sous-marine d'Aurisina, dans le Carso triestin (M. BREZNIK, 1973). La résurgence sous-marine de Port-Miou dans une des Calanques de Cassis a été décrite par le Comte de MARSIGLI dans son "*Histoire physique de la Mer*" (1725). Les moyens modernes – télédétection infrarouge, mesures de salinité, reconnaissance en plongée dans les réseaux noyés – ont permis d'inventorier de nombreuses émergences. Ces recherches ont été effectuées dans la seconde moitié du XX<sup>ème</sup>

siècle en vue de leur captage, toujours difficile en raison de l'intrusion de l'eau de mer dans le karst : réussi à la source de Kivéri, au sud d'Argos (Péloponnèse), incertain dans le cas de celle de Port-Miou (voir paragraphe II-4).

Les notes présentées dans cet article rassemblent les informations recueillies sur quelques sites majeurs au cours de colloques et de voyages d'étude, et dans diverses publications, certaines bien oubliées ! Sans vouloir rivaliser avec les travaux très pointus des hydrogéologues, mais en en tenant compte, nous nous sommes efforcé de situer les émergences dans leur contexte géomorphologique et environnemental. Grâce aux nouveaux moyens de recherche et aux publications récentes qui en font état, des précisions peuvent être apportées sur les problèmes de fonctionnement et les perspectives d'utilisation de ces sources.

## II - SITUATION ET FONCTIONNEMENT : DES PHÉNOMÈNES D'INTERFACE

D'une manière générale, en première approximation, leur position résulte de la remontée holocène du niveau de la mer, envahissant un relief karstique développé, et d'un flux d'eau douce suffisant pour vaincre l'intrusion de l'eau salée dans le réseau karstique (O. BONACCI, 1987).

### 1 ) Localisation géographique (Tab. I et Fig. 1)

Du fait de la très grande variété des littoraux calcaires méditerranéens, en rapport avec les dispositifs tectoniques, il y a divers types de sites (premier inventaire en France, G. DUROZOY et H. PALOC, 1967).

De nombreuses exurgences jaillissent directement au pied des falaises calcaires, correspondant le plus souvent à des escarpements de faille comme les sources littorales et sous-marines du Carso triestin (Aurisina : 7 sources sur une ligne de 100 m), celle de La Mortola dans les Alpes-Maritimes à la frontière franco-italienne, Font Estramar et Font-Dame en bordure des Corbières (voir chapitre III) et diverses émergences du massif des Calanques de Marseille. Le lac-source hydrothermal de Vouliagmeni, sur la côte méridionale de l'Attique, est une doline d'effondrement dans une zone de broyage.

Certaines sources sous-marines sont en rapport avec une calanque et son dispositif tectonique, comme celle de Port-Miou, près de Cassis, très importante par son débit ( $Q_m = 6$  à  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  – É. GILLI *et al.*, 2004), mais aussi Bulaž dans une calanque du sud de l'Istrie (O. BONACCI, 1987) et celles de la baie de Bakar près de Rijeka en Croatie (M. SURIC *et al.*, 2002). Des émergences littorales et sous-marines de réseaux noyés situés à faible profondeur existent dans les calanques des calcarénites miocènes de la péninsule salentine, au SE de l'Italie et sur la côte orientale de l'île de Majorque. Dans les *covas* de Majorque l'étude des concrétions a donné des indications précises sur la remontée holocène du niveau marin (J.J. Fornos *et al.*, 2002 ; P. TUCCIMEI *et al.*, 2006) (voir chapitre V).

Dans le système orogénique dinarique, la

côte adriatique de la Croatie est caractérisée par des chaînes littorales dominant les *kanali* (*canali*), vallées synclinales ennoyées. De nombreux *vruljés* jaillissent au voisinage de ces grandes unités chevauchantes, comme le Velebit et le Biokovo, alimentés par les importantes précipitations sur ces hauts reliefs et les ponors des poljés d'altitude (Fig. 2). Le terme croate *vrulja* (pluriel *vruljé*), désigne uniquement des sources sous-marines plus ou moins caractérisées par un tourbillon

Le dispositif est le même pour la source Ljuta, près de Kotor au Monténégro (Fig. 3) et l'Almyros d'Héraklion en Crète.

### 2 ) Conditions hydrogéologiques

Les grosses sources littorales et sous-marines sont les émergences d'aquifères karstiques importants et bien structurés. La plupart sont de type vaclusien, caractérisées par des vasques et conduits subverticaux : les *vruljés* en crue se manifestent par un tourbillon – et c'est pour ne pas l'avoir observé qu'É.A. MARTEL avait relégué Port-Miou au rang des galéjades... ! Sur le littoral croate, à Bakar et dans les *kanali*, dont la profondeur n'excède guère 60 m, l'origine des exutoires et la structuration du karst est mise en rapport avec les phases régressives du Quaternaire (M. SURIC, 2002). Mais lorsqu'on a pu explorer les puits jusqu'à une profondeur plus importante, de l'ordre de 150 m, comme dans le réseau de Port-Miou, à Font-Estramar, et à Ljuta près de Kotor (Tab. I), on doit envisager comme à la Fontaine de Vacluse, une karstification profonde en fonction de la régression messinienne (sur Port-Miou, B. BLAVOUX *et al.*, 2004). Régressions marines et mouvements néotectoniques peuvent interférer, comme cela se produit certainement en bordure du Velebit, dans le cas de la source sous-lacustre du lac de Siutghiol sur le littoral de la Dobrodgea (voir chapitre IV), à l'Almyros d'Héraklion en Crète et, plus évident encore, dans la circulation karstique à travers l'île de Céphonie (voir chapitre V).

Par contre, certains réseaux sont de type différent. Sur la côte orientale de la Sardaigne, dans le massif karstique de Sopramonte, si les émergences du système Utopia-Ispuligedenie, au sud du massif, sont situées entre -30 et -80 m (J. DE WAELE), les eaux cascades de l'important réseau de Codula di Luna débouchent au voisinage du niveau marin actuel : dans Bue

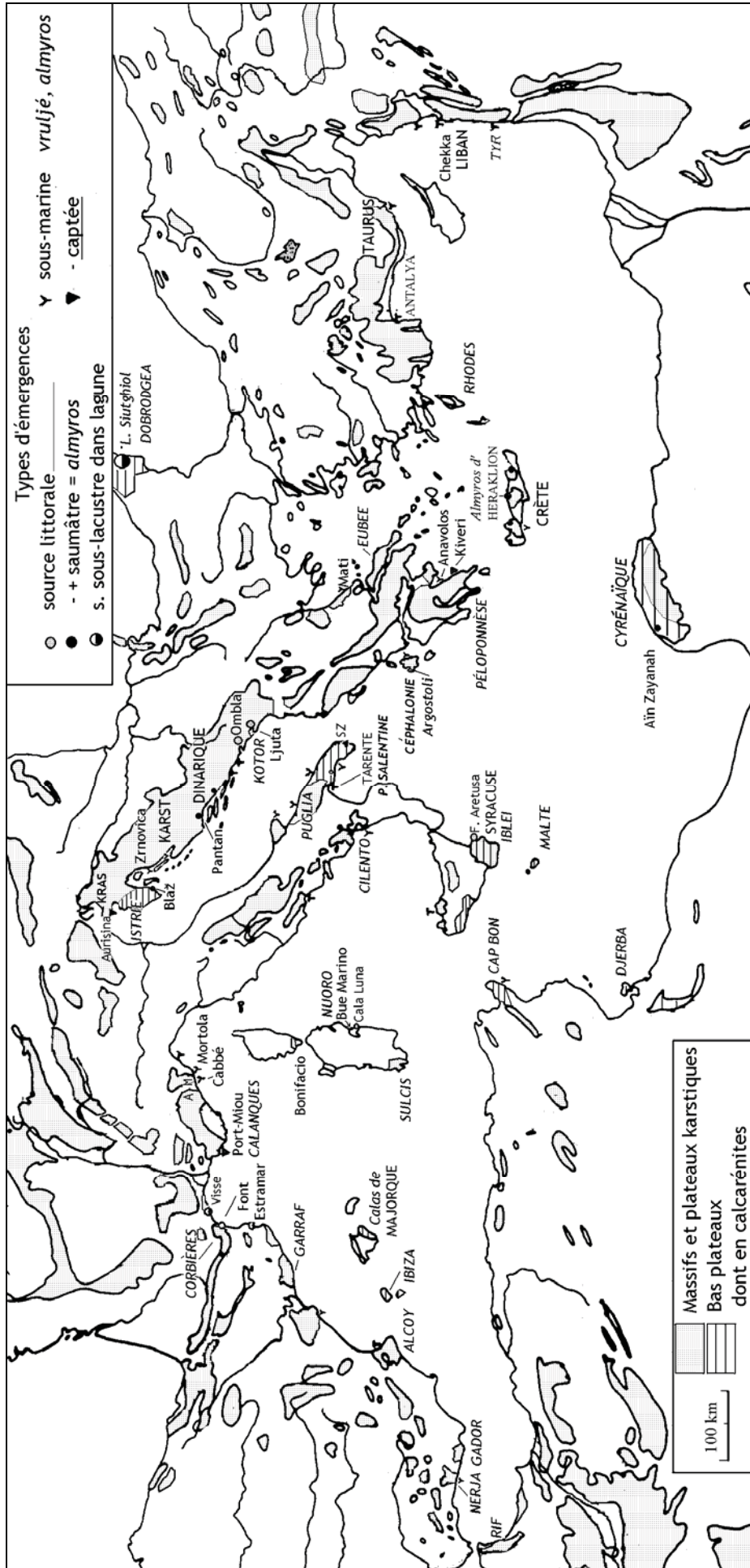


Figure 1 - Carte des karsts littoraux autour de la Méditerranée et des principales sources littorales et sous-marines. D'après les indications dans M. BREZNIK (1974), B. HAKIM (1995 – carte F) et les auteurs en référence du tableau I.

Cas particulier dans la péninsule salentine : SC = Santa Cesarea Terme, source thermique sulfureuse dans une grotte littorale.

Voir également les cartes en Annexes.

Tableau I - Quelques sources littorales et sous-marines, classées par rapport au niveau actuel de la mer.

	Localisation	Cote de l'émergence en m	Profondeur connue du réseau, m	Remarques
<i>A - Sources littorales</i>				
1	Ljuta (Obrovac-Kotor, Monténégro)	+25	-133	Vauclusienne
2	Almyros d'Héraklion (Crète), alimentée par le karst du Mont Ida	+3,7 à +4,7	vasque -20	Saumâtre en été, profondeur du mélange -450 m ?
3	Pantan (près Trogir, Dalmatie)	+2,5 à +4		Saumâtre en été → 9 g/l Cl <sup>-</sup>
4	Vouliagmeni (Attique, Grèce)	+0,4	-105	Doline-source hydrothermale
5	Font-Estramar (Corbières, France)	+1	-147	Sur faille néotectonique
6	Bue Marino (Est Sardaigne)	≅0		Réseau > 10 km, Syst. Codula di Luna
7	Aïn Zayanah (Cyrénaïque, Lybie)	+1		Réseau dans plateau miocène ; saumâtre, type Almyros *
<i>B - Sources sous-marines</i>				
8	Cala Luna (cf. Bue Marino) Sardaigne	-5		Source principale Syst. Codula di Luna
9	Système Utopia-Ispuligedenie ( <i>idem</i> )		-30 à -80	Grands tunnels noyés
10	Kivéri (cote est du Péloponnèse)	-5		Résurg. poljé Tripolis, captée
11	Port-Miou (Calanques, Provence)	-12	-147	Réseau .>2 km, capt. à problèmes
12	Mortola (frontière France-Italie)	-39		
13	Chekka (Nord Liban)	-20 à 50	≅ -150 ?	Artésiennes, captage envisagé
14	Gd Anavalos d'Astros (E Péloponnèse)	-72		Résurgence poljé Tripolis

\* : Le terme grec *almyros* désigne des sources plus ou moins saumâtres, qu'elles soient littorales (Almyros d'Héraklion) ou sous-marine (Kivéri).

Références : 1 : S. MILANOVIĆ (2005) ; 2 - M. BREZNIK (1973), B. ARFIB *et al.* (2002, 2006) ; 3 - O. BONACCI (1987, p. 99) ; 4 - J.J. BOLANZ et V. GIANNOPOULOS (1997) ; 5 - H. SALVAYRE (1974) ; 6 - P. FORTI et G. ROSSI (1991) ; 7 - P. KOSA (1977) ; J. NICOD (2000) ; 8 - P. FORTI et G. ROSSI (1991) ; 9 - DE WAELE (2004) ; 10 - D.J. BURDON (1965) ; 11 - É. GILLI *et al.* (2004) ; 12 - M. BREZNIK (1973) ; 13 - R. KAREH (1967) ; 14 - D.J. BURDON (1965).

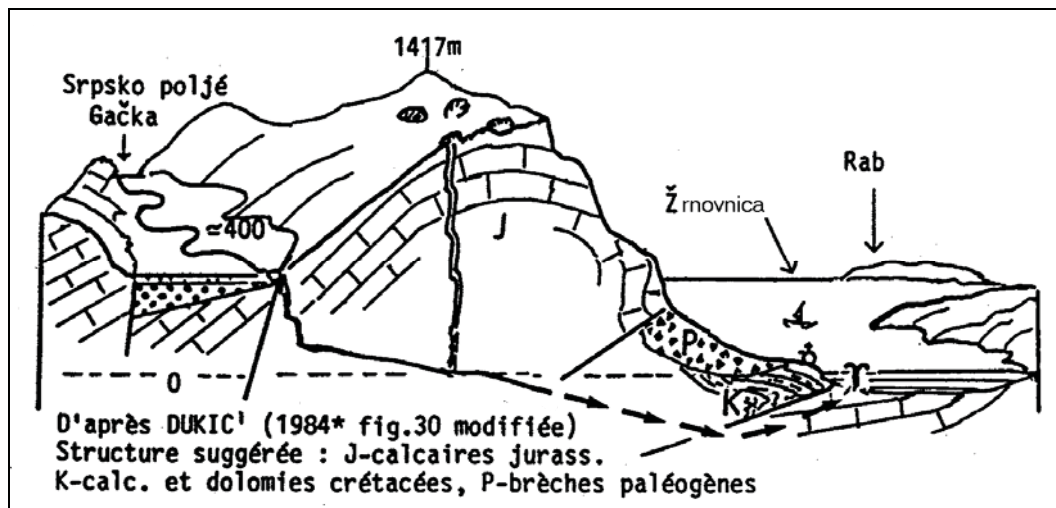


Figure 2 - Position des vruljés de Žrnovnica, près de Senj, sur le littoral adriatique nord de Croatie.

La source sous-marine est alimentée par le massif karstique du Velebit et la perte de la rivière Gačka, distante d'environ 17 km. Références in J. NICOD 2003, p.34.

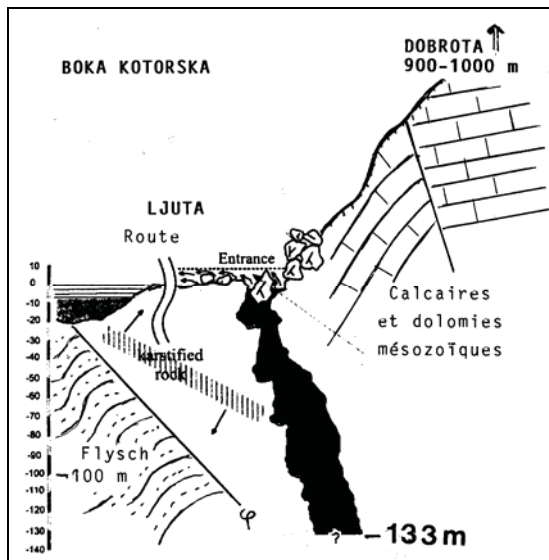


Figure 3 - Source Ljuta, à Orahovac, sur le littoral au nord de Kotor (Monténégro).

D'après S. MILANOVIĆ, 2005, schéma complété.

Marino, la célèbre Grotte du Phoque et dans l'exutoire sous-marin de Cala Luna. Sur les littoraux de certains plateaux karstiques, comme celui de calcarénites miocènes de la péninsule Salentine, les exurgences correspondent à des réseaux horizontaux proches du zéro actuel. Il en est de même dans le cas d'Aïn Zayanah, en Cyrénaïque (Fig. 4).

Dans le cas de Chekka, il s'agit des émergences ennoyées d'un système artésien alimenté par le karst du Mont Liban (Fig. 5).

### 3) Le fonctionnement hydrologique

Les variations de débit et l'afflux d'eau salée à certaines saisons dans les sources littorales avaient été déjà remarqués dans l'Antiquité :

ainsi, à Syracuse, dans la patrie d'Archimède, les dysfonctionnements de la source Aretusa (Photo 1) – pics de salinité et tarissements subits en relation avec les séismes – faisaient l'objet d'une légende. Comme il est analysé dans de nombreux ouvrages (M. BREZNIK, 1973 ; O. BONACCI, 1987 ; D.C. FORD et P.W. WILLIAMS, 1989 ; É. GILLI *et al.*, 2004 ; *etc.*) nous rappellerons seulement que ces émergences fonctionnent à l'interface eau douce - eau salée dans les aquifères karstiques, la première moins dense se superposant dans les aquifères au *biseau salé*. Mais un certain mélange peut s'opérer, en raison de la complexité des réseaux karstiques, et les eaux devenir plus ou moins saumâtres, le plus souvent en saison estivale ou seulement épisodiquement et, dans les cas de captage, par l'effet du cône de dépression induit par les pompages.

Figure 4 - Aïn Zayanah (Cyrénaïque).

**a** : Réseau en partie noyé (en noir) dans les calcaires miocènes. **b** : coupe de Bukarma puits de 40 m de diamètre, exploré à -55 m (d'après J.C. DOBRILLA, 1991).

Références et discussion sur l'ancienneté et le fonctionnement du système in J. NICOD (2000 – d'après les travaux de K.H. PFEFFER, 1975).

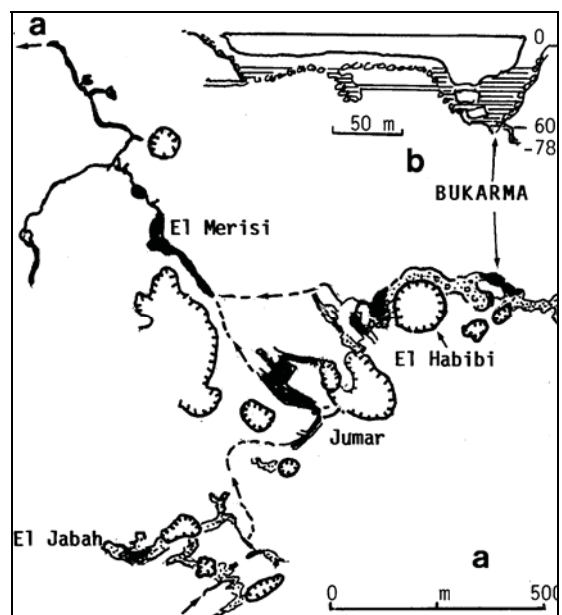




Photo 1 - La fontaine Aretusa, dans l'île d'Ortygie, cœur de Syracuse. [cliché : J. NICOD, 2000]

Ses dysfonctionnements (pics de salinité et tarissements subits en relation avec les séismes) avaient suscité la légende de la nymphe Aréthuse.

Photo 2 - Le golfe d'Argostoli et les Moulins de la mer dans l'île de Céphalonie. Nouvelles roues construites après le séisme de 1953. [cliché : J. NICOD, 1963]



Photo 3 - Le gouffre de Melisani (-66 m), près de Sami, à l'est de l'île de Céphalonie.

Lac saumâtre, profond de 36 m, regard sur la circulation karstique à travers l'île. Haut-lieu touristique.

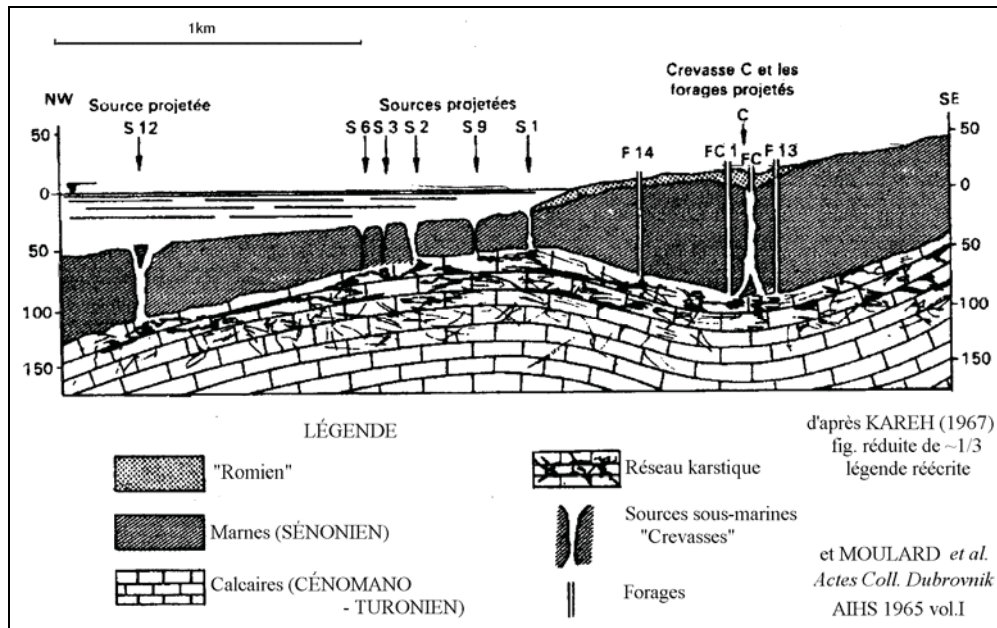


Figure 5 - Le système artésien de Chekka, au Liban (au sud de Tripoli), émergences entre -5 et -120 m dont le captage était projeté. Faisabilité reprise dans le projet MEDIDATE 2004/2007, jugée non concluante (*La Recherche*, n°421, 2008, p. 58).

Cette émergence karstique importante ( $Q_m = 5\text{m}^3/\text{s}$ ), située à 20 km au N de Benghazi, avait été étudiée par la Société des Eaux de Marseille dans le but d'un captage à des fins agricoles et domestiques. Mais elle est plus ou moins saumâtre, suivant les saisons, par mélange d'eau douce et d'eau de mer. Elle jaillit entre +1,2 et +1,5 m sur le rebord d'un plateau de calcaire helvétien particulièrement karstifié, avec dolines d'effondrement et galeries noyées : El Habibi, vaste doline de 140 m de diamètre donnant accès au plan d'eau, El Merisi, réseau de 2177 m de conduits noyés. Le plateau calcaire ne reçoit que de faibles précipitations ( $< 300\text{ mm/an}$ ), mais en situation de piémont par rapport au J. Akhdar plus arrosé (485 mm à El Marsah) son aquifère en charge contrebalance l'intrusion d'eau marine.

D'une manière générale, comme cela se passe à Aïn Zayanah, la salinité diminue fortement lors des crues et augmente à l'étiage lorsque le flux d'eau continentale n'est plus suffisant pour refouler l'eau de mer (Fig. 6). Le processus a été particulièrement bien étudié à l'Almyros d'Héraklion et à la source Pantan près de Trogir en Dalmatie (M. BREZNIK, 1973 ; C. BÉZES et C. JOSEPH, 1983 ; O. BONACCI, 1987 ; R. MAIRE, 1990 ; É. GILLI, 1999).

Lors des crues à Port-Miou, il s'agit plutôt

d'un phénomène de dilution. En cas d'exploitation, le pompage, en période de moindre alimentation d'eau douce, crée une dépression qui facilite l'intrusion de l'eau de mer par les multiples fissures, comme cela se produit à Port-Miou (É. GILLI *et al.*, 2004).

#### 4 ) Le problème de l'exploitation des sources littorales et sous-marines

En raison de ces conditions hydrologiques, le captage de ces sources, qui représentent une ressource considérable pour la fourniture d'eau d'irrigation et d'alimentation urbaine sur les rivages de la Méditerranée, est malheureusement aléatoire (O. BONACCI, 1987 ; É. GILLI *et al.*, 2004). Diverses techniques ont été expérimentées pour limiter l'intrusion d'eau salée (B. MIJATOVIĆ, 2005).

Dans le Carso, la ville de Trieste, après une première tentative en 1860, a pu capter l'une des sources sous-marines d'Aurisina (Brojnica) en l'entourant d'une digue (F. GEMITI, 2004).

De même à Kivéri, sur la côte orientale du Péloponnèse, on a eu recours à un barrage en demi-cercle isolant l'émergence (Fig. 7). Ces captages ont été réussis, car les exutoires étaient

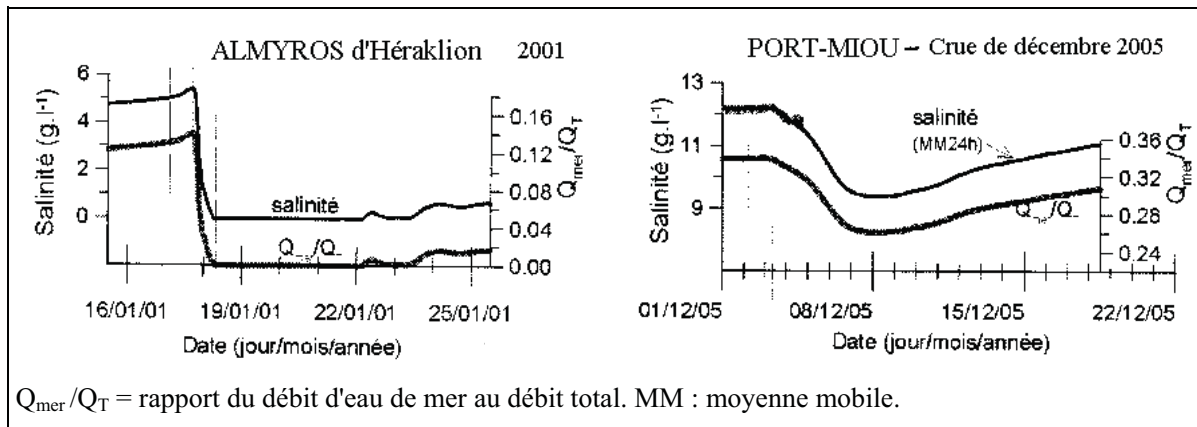


Figure 6 - Diminution de la salinité lors des crues à l'Almyros d'Heraklion (du fait des actions hydrodynamiques : mise en charge élevée qui bloque l'intrusion d'eau de mer) et à Port-Miou, (par dilution de l'eau de mer dans l'afflux d'eau douce). Extrait des figures 4 et 5 de B. ARFIB *et al.*, 2006.

peu profonds et les structures favorables. Le captage a été réalisé en 1970. Cette exurgence sous-marine à -5 m est principalement alimentée par le ponor de Nestani, dans le poljé de Tripolis, à 636 m d'altitude, distant de 27 km. Elle peut

donner jusqu'à 10m<sup>3</sup>/s ; grâce à la puissance du débit, l'eau n'est que légèrement chlorurée (3 à 4 g/l de Cl<sup>-</sup>) (D.J. BURDON, 1965 ; M. BREZNIK, 1973).

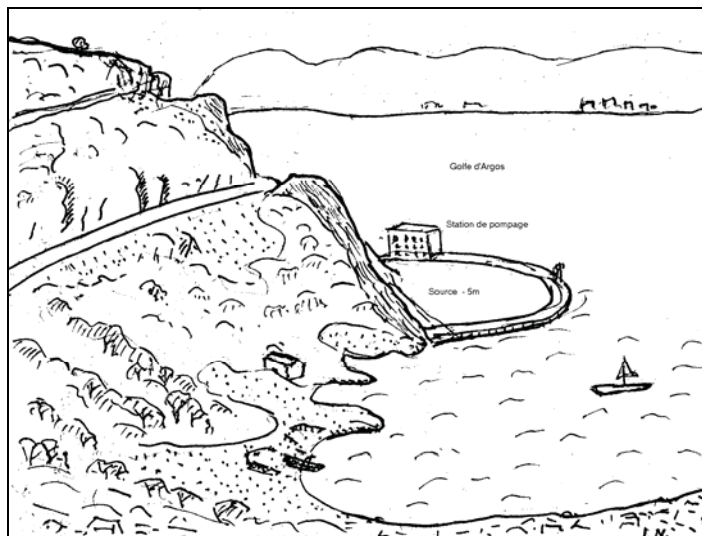


Figure 7 - Source captée d'Agios Georgios, près de Kivéri. Croquis d'après une photo.

Dans d'autres cas, la solution le plus souvent envisagée est d'essayer de forer en amont de l'exutoire, sur le cours souterrain préalablement reconnu : hélas, échec partiel à Port-Miou, malgré le barrage construit dans le conduit (Fig. 8), et expérimentation non concluante sur l'émergence sous-marine de Cabbé, près de Roquebrune-Cap Martin (É. GILLI, 2002).

### III - FONT-ESTRAMAR ET FONT-DAME : SUR LE LITTORAL DES CORBIÈRES ET UN CURIEUX MILIEU LAGUNAIRE

Ce sont deux sources vauclusiennes à la fois bien connues des pêcheurs de l'étang de Salses



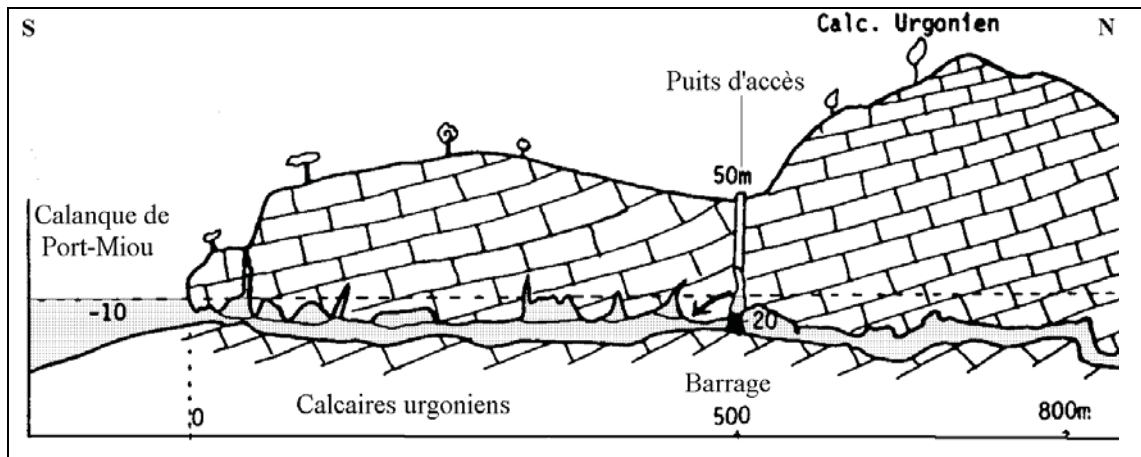


Fig. 8 - Le barrage de Port-Miou, d'après L. POTIÉ (1974).

La flèche indique le déversoir de crue.

(ou de Leucate), et curieusement ignorées, bien qu'en bordure de la R.N. 9 à l'incessant trafic. Elles sont pourtant très intéressantes par leur site et les conditions de fonctionnement.

### 1) Les sites : au pied de l'escarpement des Corbières sur l'étang de Salses

Font Estramar (ou source de la Rigole) jaillit au pied d'un escarpement d'origine tectonique, sur le rebord d'un plateau de près de 200 m d'altitude, dans les calcaires massifs de faciès urgonien (barrémo-aptiens). Font-Dame est une source sous-lacustre, formée de huit fissures émissives dissimulées par un marais flottant de phragmites (prolongement des "sagnes" de Salses). Toutes les deux sont des sources vaclusiennes importantes : Font Estramar,  $Q_m = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , Font-Dame  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mais elles présentent de grands écarts de débits : Font Estramar entre 60 et  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . D'autres sources jalonnent le même contact tectonique : l'exurgence temporaire du Malpas, et des émergences à travers les alluvions, dans la plaine de Salses (H. SALVAYRE, 1974, 2002). L'ensemble représente les exutoires de l'hydrosystème karstique des Corbières sud-orientales.

### 2) Font-Estramar : une réplique de la Fontaine de Vaucluse et de Port-Miou (Fig. 9)

Les récentes explorations en plongée donnent une idée d'un réseau noyé très important (SALVAYRE 2002). Les éléments principaux sur les 2750 m actuellement connus comportent une

vasque, un réseau presque horizontal, de -36 à -50 m, et une vaste cavité oblique, reconnue jusqu'à -147 m de profondeur. Comme à la Fontaine de Vaucluse et à l'extrémité connue de Port-Miou, l'existence d'une cavité de ce type témoigne d'une évolution lors d'une phase régressive très importante, vraisemblablement celle du Miocène supérieur (Messinien). Deux autres éléments sont à noter :

- la température élevée de l'eau ( $18^\circ\text{C}$ ) témoigne d'une zone noyée profonde importante, dans un contexte géothermique lié à la tectonique ;
- dans la grande cavité terminale, la présence de concrétions et des bancs de galets siliceux signifie des phases de dénoyage du réseau, au cours du Quaternaire.

### 3) L'alimentation du système : le Karst des Corbières d'Opoul et les pertes de l'Agly (Fig. 10)

Cet ensemble de plateaux est constitué par les séries carbonatées du Jurassique (surtout les calcaires blancs du Malm, 200 m de puissance) et celle du Crétacé inférieur de faciès urgonien. Entre les deux les calcaires marneux du Berriasien peuvent déterminer des petits aquifères perchés, mais ne constituent pas un obstacle infranchissable à la pénétration des eaux, du fait de la fracturation. L'ensemble, qui fait partie de la nappe des Corbières mise en place lors de la phase paroxysmale pyrénéenne, est affecté par un réseau de faille NE-SO et NNO-SSE. La position élevée ( $\approx 60 \text{ m}$ ) du plateau de calcaires lacustres pliocènes de Leucate témoigne d'une néotectonique récente, probablement quaternaire, d'après

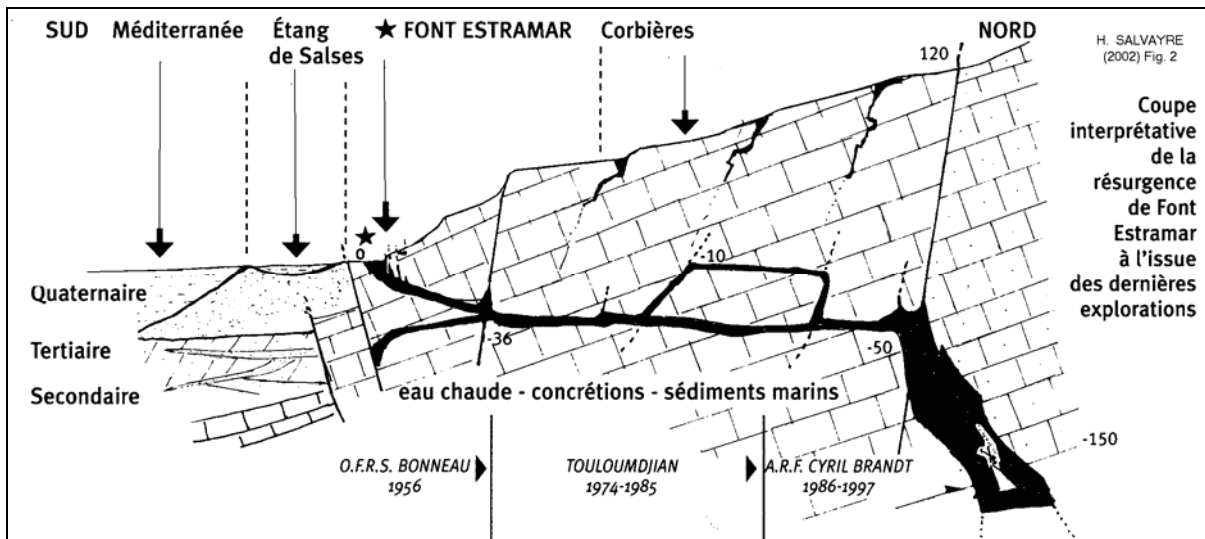


Figure 9 - Le système de la résurgence de Font Estamar (Corbières d'Opoul), d'après H. SALVAYRE (2002). Développement longitudinal du réseau : 410 m environ.

les indications données par les miroirs de failles affectant des remplissages karstiques dans la carrière de Font-Dame (M. CALVET, 1999, p. 262). Le système de faille NO-SE se raccorde à la faille de la Têt, qui joue en décrochement senestre (séisme de Caramany, 1978).

Toutefois la karstification est en grande partie héritée, comme le montrent la position du poljé d'Opoul et celle de certains avens, par exemple le Barrenc de l'Hydre (-354 m), perché sur le Montoullié de Périllou à 626 m d'altitude (Fig. 10).

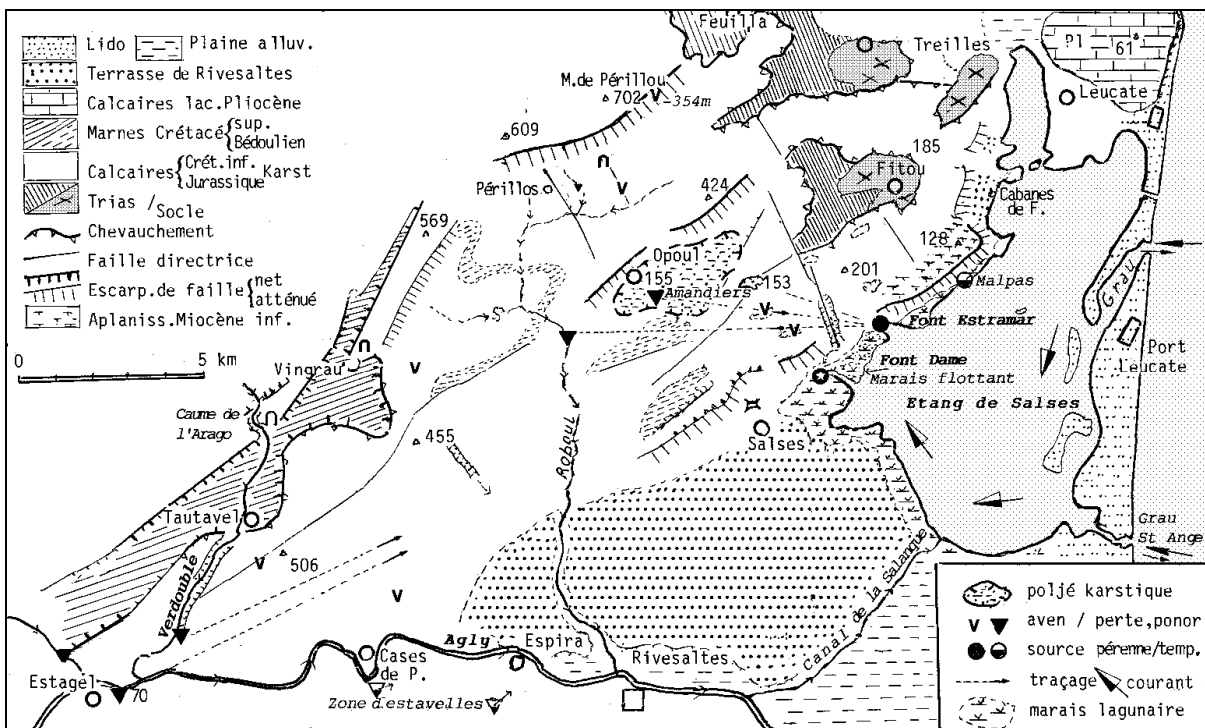


Figure 10 - Le karst des Corbières d'Opoul et l'Étang de Salses - Leucate.

Données hydrogéologiques d'après H. SALVAYRE (2002) et la carte géologique Leucate au 1/50000 (BGRM, 1982).

Le poljé d'Opoul est un bassin karstique d'orientation NE-SO, au pied d'un escarpement de faille très évolué de même orientation. Son fond à 155-152 m d'altitude est un peu en contrebas d'un paléo-niveau de karst à buttes probablement miocène. Les plans de cette paléotopographie sont situés vers 200 m d'altitude, donc au-dessus du seul aplanissement net, celui du Plat de la Coume Servi (128 m) marqué par un dépôt de Miocène inférieur marin (sur ces paléotopographies des Corbières, cf. M. CALVET, 1992).

Différentes dépressions karstiques et vallons secs, exploitant les accidents tectoniques, comme l'ouvala du Mas d'en Bac (fond aussi à 153 m) et le poljé lui-même sont inscrits dans cette paléotopographie. Le poljé s'est développé en partie dans les marnes jaunes du Bédoulien, permettant une certaine étanchéité de son fond, donc des possibilités de submersion temporaire : un lac de 15 ha, lors des pluies diluviennes des 12-13 novembre 1999 (248 mm à Tautavel).

Les eaux de ce lac épisodique, et celles de deux petits cours d'eau temporaires sont absorbées par les deux avens des Amandiers, qui jouent le rôle de ponors. Une coloration effectuée le 11 novembre 1962 a montré les relations rapides avec Font Estramar. Un forage profond réalisé en 1997 au sud d'Opoul a permis d'atteindre la zone noyée : débouchant dans une cavité à 250/300 m de profondeur : cela confirme les informations sur la karstification profonde de ce secteur des Corbières (H. SALVAYRE, 2002).

Ce bassin d'alimentation karstique s'étend loin vers le SE, comme l'ont montré les traçages effectués à partir du gouffre du pont sur le Roboul (alt. 200 m, -105 m) et des pertes de l'Agly et du Verdoble, près d'Estagel (à 16/18 km des résurgences). La perte principale dans le lit de l'Agly, celle des "Tourbillons" est située au niveau du gué d'Estagel, d'autres existent en aval, et assèchent le cours d'eau en période d'étiage. Celles du Verdoble sont multiples dans le canyon en aval de Tautavel, la plus fréquente se trouve au contact des dolomies du Bathonien. L'ensemble des pertes apporterait 0,5 m<sup>3</sup>/s au système de Font Estramar-Font-Dame (*ibidem*).

#### 4 ) Les rapports avec le milieu lagunaire

Il s'agit de l'évolution d'un ancien golfe en

fonction des variations du niveau marin au cours de l'Holocène. Vers 7000 BP la mer est à -7 m et l'Agly construit un delta dans la partie méridionale actuelle de la l'étang de Salses. Vers 4500 BP la mer atteint son niveau actuel, et les matériaux du paléo-delta sont remaniés pour constituer le cordon littoral externe, puis un cordon intermédiaire, celui de l'îlot de la Rascasse, vers 2700-2000 BP, lors d'un niveau marin redescendu de 1 à 2 m, ce qui isole le bassin sud, celui des sources (C. DUBOUL-RAZAVET et R. MARTIN, 1981).

Des tessons de poterie romaine reposant sur une plage de sable fin à -4 m, découverts lors de travaux routiers près du Moulin de Font-Dame indiquent que le marais flottant n'existait pas alors. Sa création est en rapport avec l'élévation post-romaine du niveau marin attestée dans la basse vallée de l'Aude (P. AMBERT *et al.*, 1978) et les conditions de sédimentation dans l'étang.

L'étang de Salses-Leucate est vaste (5400 ha), relativement profond (jusqu'à 3,5 m) et soumis aux influences marines par les graus. Dans le bassin nord le vent dominant du NO induit un courant qui entraîne les particules fines vers la rive sud-occidentale, permettant le développement des marais à roseaux. Ils sont soumis à une double influence : celle des eaux douces des résurgences, et d'afflux d'eau saumâtre, lors des vents d'est, provoquant une montée du niveau de la lagune jusqu'à +1 m. On note aussi, comme dans de nombreuses sources littorales, du type *almyros*, une certaine contamination par les eaux d'origine marine : la chlorinité peut y dépasser 1g/l de Cl<sup>-</sup> en période d'étiage.

Dans le passé les sources avaient été utilisées. Au XIX<sup>ème</sup> siècle un barrage établi dans les marais de Font-Dame permettait de faire tourner un moulin. Mais maintenant il s'agit d'une utilisation indirecte de leurs eaux : deux établissements piscicoles, établis dans les marais proches, peuvent élever des espèces variées, comme les loups et les dorades, profitant d'un milieu biologiquement très riche, à cause de la confrontation des eaux douces et marines. Mais ce milieu a été modifié du fait de l'aménagement des passes navigables (les deux graus de Leucate et de Saint Georges-Port Barcarès) à travers le lido devenu espace touristique, ce qui a entraîné l'augmentation de la salinité et permis le développement de la conchyliculture (C. VERLAQUE, 1981).

#### IV - L'ALIMENTATION KARSTIQUE DU LAC SIUTGHIOL SUR LE LITTORAL DE LA DOBRODGEA

Cet exemple, découvert à l'occasion du *V<sup>ème</sup> Colloque de Géographie franco-roumain* (1975) sous la direction de P. GAȘTESCU et A. GUILCHER, présente une similitude de position avec les sources du front des Corbières dans la lagune de Salses-Leucate. Toutefois le fonctionnement du système est différent.

La côte initialement sinueuse de la Dobrodgea sur la Mer Noire a été régularisée au cours de l'Holocène par des flèches formées par les alluvions provenant du Delta du Danube. Le cordon sableux de Mamaia isole complètement le lac Siutghiol (19 km<sup>2</sup>) dont le niveau moyen naturel est à +1,8 m. Ce lac est alimenté sur sa bordure ouest par de grosses émergences sous-lacustres, entonnoirs émissifs sondés à -18 m.

Elles sont situées sur le tracé de la faille N-S Ovidiu-Capidava, en position de barrage karstique (Fig. 11).

Le plateau de la Dobrodgea méridionale (Fig. 12) est constitué par les calcaires sarmatiens superposés à la série carbonatée mésozoïque. Sa karstification est importante et ancienne : formes de surface, paléo-poljés plus ou moins masqués par la couverture loessique, et anciens réseaux (dont la célèbre Peștera de la Movile plus au sud, près de Mangalia). Il s'agit de paléokarsts réalisés en fonction des mouvements néotectoniques, et des niveaux régressifs de la Mer-Noire (lac Euxin) et réactivés (C. LASCU *et al.*, 1994/95). Un sondage effectué à proximité du lac, à Palazu Mare pour l'alimentation en eau de Constanța, a rencontré d'importants conduits noyés vers -550 m, au voisinage du contact calcaires/roches métamorphiques (M.D. BLEAHU, 1974, p. 472). Dans ce secteur, l'aquifère des calcaires jurassiques sous les marnes aptiennes fonctionne en charge.

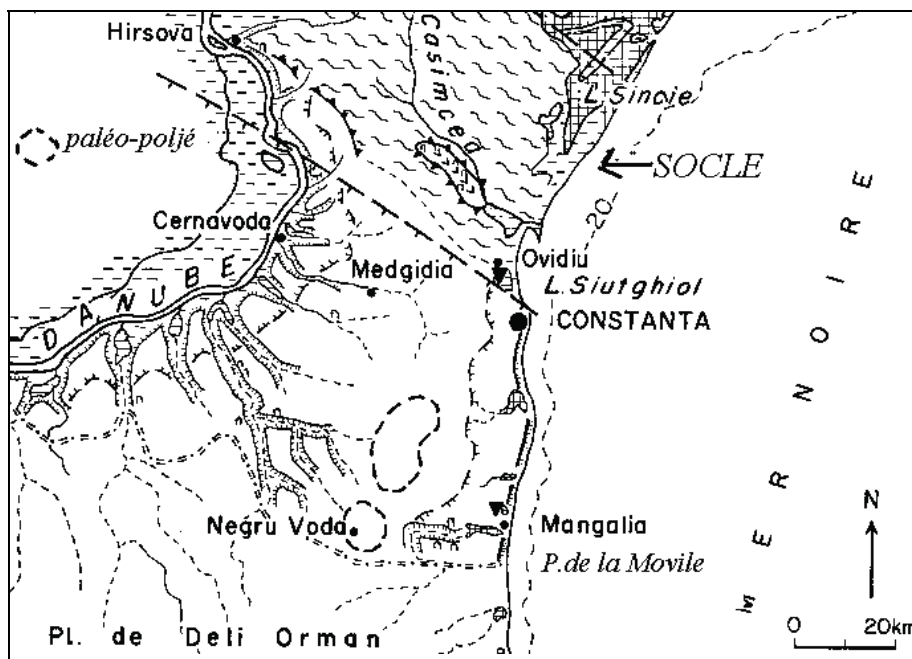


Figure 11 - Situation du karst de la Dobrodgea méridionale (J. NICOD, 1977, fig. 1).

L'eau des sources sous-lacustres de la Dobrodgea (2 à 2,5 m<sup>3</sup>/s) provient des précipitations sur les parties élevées du secteur (le plateau de Deli-Orman reçoit 600 mm environ de pluie par an). Cette alimentation assure au lac un niveau, contrôlé par un barrage sur son émissaire, supérieur à celui de la Mer Noire ; aussi la chlorinité est-elle faible, résultant principale-

ment d'infiltrations profondes à travers le cordon de Mamaia (effet classique du "biseau salé"). Toutefois, dans les années 60, la surexploitation des eaux du lac pour l'irrigation et l'industrie avait dangereusement abaissé son niveau de près d'un mètre et accru sa salinité ! (P. GAȘTESCU et A. BREIER 1975).

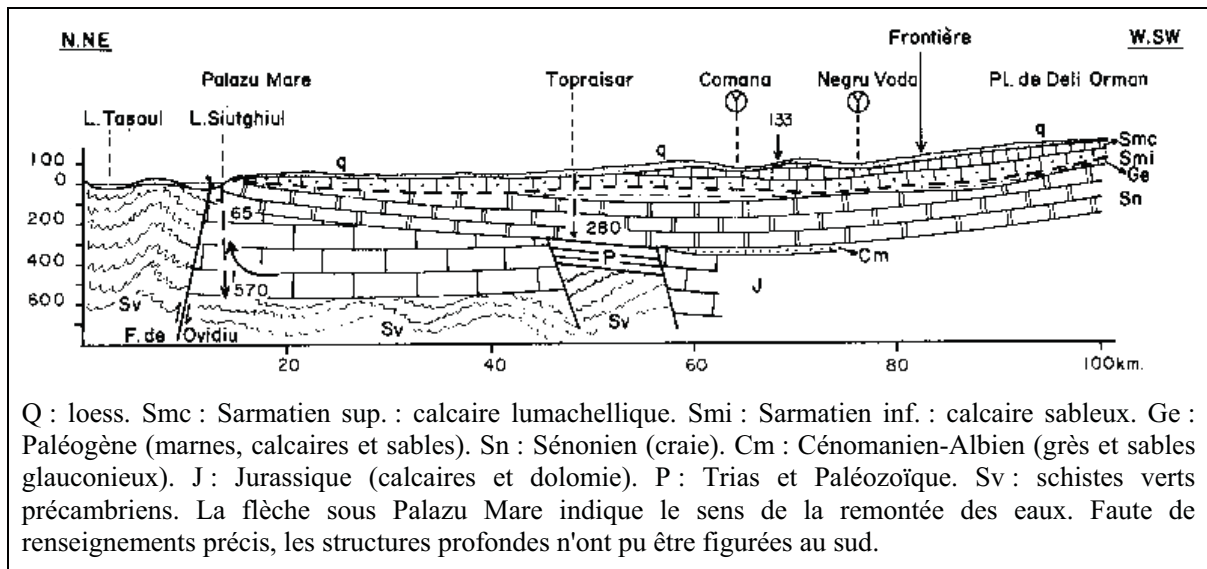


Figure 12 - Coupe à travers la Dobrogea méridionale (d'après NICOLESCU, 1965).

## V - L'ÉGNYME DES MOULINS DE LA MER D'ARGOSTOLI, DANS L'ÎLE DE CÉPHALONIE (GRÈCE)

Les Moulins de la mer d'Argostoli (Photo 2) constituent une curiosité unique, décrite succinctement dans tous les guides de voyage. Connue en France grâce à É.A. MARTEL (1922), elle a fait l'objet de nombreuses études et interprétations contradictoires. L'énigme a été résolue, pour l'essentiel, par les recherches de l'école hydrogéologique de Graz (V. MAURIN et J. ZÖTL, 1960, 1965). Ces travaux sur ce

problème ont largement contribué à la connaissance sur le fonctionnement des sources littorales saumâtres et des sources sous-marines.

Ces moulins sont situés sur le littoral est de la péninsule d'Argostoli, au nord de la ville, dans la partie occidentale de l'île montagneuse de Céphalonie. Les moulins anciens fonctionnaient grâce à la chute de courts ruisseaux d'eau de mer, absorbée par les *katavothres* sur lesquels ils étaient installés. Détruits par le séisme de 1953, ils ont été remplacés par des roues métalliques, qui tournent pour satisfaire la curiosité des touristes... (Fig. 13).

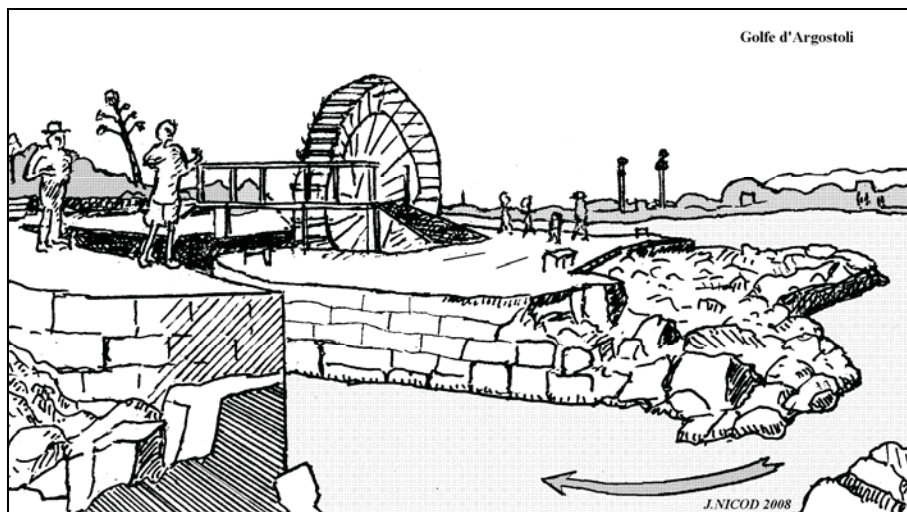


Figure 13- Les Moulins de la mer d'Argostoli.

D'après une photo prise en 1983 lors de la visite du site sous la direction d'Anna PETROCHILOU.

## 1) Le contexte tectonique et géomorphologique

Céphalonie est une île de 750 km<sup>2</sup>, se présentant comme un ensemble de plateaux et massifs élevés de 900 à 1000 m d'altitude au nord, et culminant au sud au Mont Aenos (1628 m). Elle appartient au système structural des îles ioniennes. Presque entièrement carbonatée (Fig. 14), elle est surtout constituée par la puissante série de calcaires bien lités du Crétacé, appartenant à la zone isopique pré-apulienne, et en pendage isoclinal vers l'ENE sur la transversale Argostoli-Sami. Par contre le massif au sud de Sami est formé des calcaires jurassiques

de la zone Ionienne, chevauchant les flyschs, et avec extrusion du Trias évaporitique au sud. Cet ensemble est très tectonisé : charriage vers l'ouest, système orthogonal de failles ayant rejoué à diverses époques. La tectonique reste active, le séisme catastrophique de 1953 a produit un léger basculement de l'île, marqué par des exhaussements de 0,8 à 1 m sur la côte SO, et de 0,3 m à Argostoli ; par contre à Haghia Euphemia au NE le niveau de la mer s'est élevé de 0,3 m, et ses sources littorales saumâtres seraient devenues de ce fait sous-marines (V. MAURIN et J. ZÖTL, 1960). La subsidence du littoral de Sami est attestée dès l'Holocène ancien (P.A. PIRAZZOLI *et al.*, 1994).

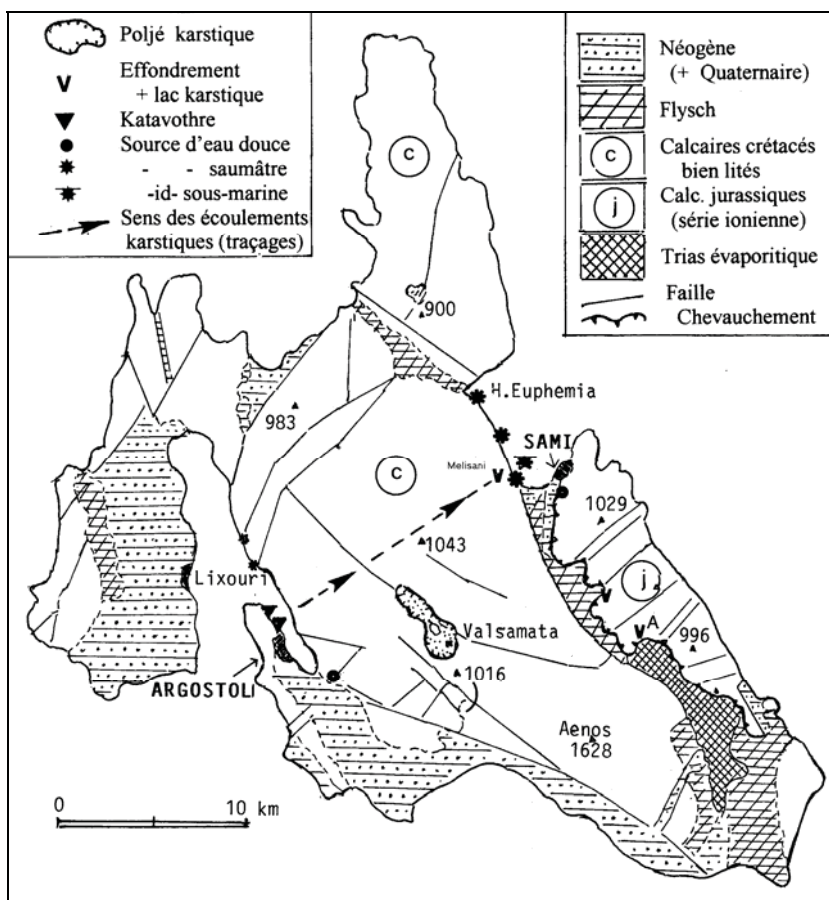


Figure 14 - Carte structurale et hydrogéologique de Céphalonie.

D'après : Carte géologique de l'Épire au 1/100 000 (Éditions Technip, 1966) ; V. MAURIN et J. ZÖTL, 1965 ; B. BOUSQUET, 1974.

Les séries carbonatées ont été affectées, grâce à la fracturation, d'une importante karstification traduite par des dolines-lacs d'effondrement (les deux Akoli) et le gouffre de Melisani (Photo 3), ainsi que par le petit poljé de Valsamata, perché vers 600 m d'altitude au cœur de l'île. Le système hydrogéologique postule une karstification profonde réalisée lors des niveaux

marins régressifs, lorsque le golfe d'Argostoli fonctionnait comme poljé.

## 2) L'analyse hydrologique

Les conditions bioclimatiques représentent un autre facteur favorable au développement de

l'infiltration karstique : soumise au climat ionien, l'île est relativement bien arrosée (Pm annuelles : 860 mm à Argostoli) et elle était boisée. Mais des forêts de chênes et de sapins ne subsistent que dans des espaces protégés, surtout sur le Mont Aenos (réserve d'*Abies Cephalonica*) ; le pastoralisme, surtout à basse altitude, leur a substitué des *phryganes*, landes à euphorbes et à pimprenelles épineuses (*Poterium spinosum*).

La plupart des sources sont proches du littoral, et se répartissent en trois catégories, d'après l'analyse minutieuse de V. MAURIN et J. ZÖTL (1960) :

- quelques sources d'eau douce, dont celles de Kutavos (captée pour Argostoli) et celles de Sami ;
- des sources d'eau saumâtre sur le littoral du golfe de Sami, particulièrement celle de Karavo-mylos près de Nea-Vlachata, et celles d'Haghia Euphemia ;
- des sources sous-marines dans le golfe de Sami.

Les traçages à l'uranine depuis les Moulins

de la mer ont montré que le flux principal s'établissait d'Argostoli vers les sources près de Nea Vlachata. À proximité l'énorme gouffre de Mélisani (-66 m) contient un petit lac souterrain d'eau légèrement saumâtre, profond de 36 m, d'environ 5000 m<sup>3</sup> : c'est un regard sur la circulation karstique en diagonale à travers l'île (Fig. 15 ; Photo 3). De plus, il a été affecté par le séisme de 1953 : effondrement au fond, inclinaison des stalactites.

### 3 ) Comment fonctionne le système ?

Évidemment on a fait appel d'une manière classique, à la théorie des vases communicants. L'eau de mer des pertes (Qm = 0,3 m<sup>3</sup>/s) est plus dense ( $\delta = 1,026$ ) que l'eau saumâtre de Melisani et des sources voisines : une dépression moyenne de -1 m aux pertes serait équilibrée d'après les calculs théoriques à une surélévation de +2 m à Melisani (E.W. BAUER, 1971). Le mélange des eaux s'effectue dans le karst profond. Mais il faut un moteur pour pousser les eaux dans le sens Argostoli-Sami.

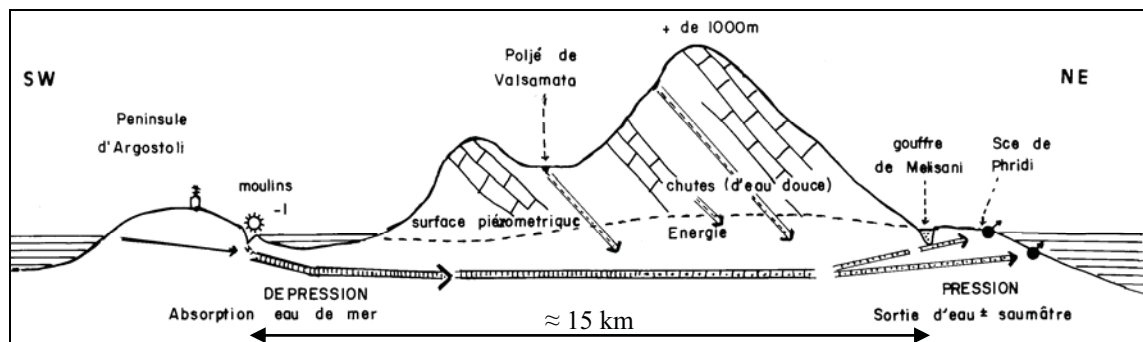


Figure 15- Schéma hydrogéologique de l'île de Céphalonie d'après V. MAURIN et J. ZÖTL (1965).

V. MAURIN et J. ZÖTL (1963, 1965) ont démontré le rôle de chutes d'eau issues des pertes dans le poljé de Valsamata et du karst d'altitude ; les gouffres sont inclinés suivant le pendage général vers l'ENE, et l'énergie cinétique des chutes contribue à pousser la circulation interne dans cette direction. Ce modèle théorique a été repris dans plusieurs manuels (O. BONACCI, 1987 p. 109 ; D.C. FORD et P.W. WILLIAMS, 1989, p. 505 ; É GILLI *et al.*, 2004 ; *etc.*).

Récemment une autre hypothèse a été présentée (C. DROGUE et G. SOULIOS, 1988). Elle fait intervenir le rôle du courant marin en

général orienté SSO-NNE dans la Mer Ionienne, qui produit une surélévation de niveau de près de 30 cm dans le golfe d'Argostoli. Le mouvement ainsi initié est relayé par le courant de densité à travers le karst profond de l'île. Mais cela suppose que les pertes de charge dans le système soient faibles, en rapport avec une karstification développée pendant les périodes de niveau marin régressif. Cette seconde hypothèse permet d'expliquer des variations périodiques du flux d'eau de mer absorbé à Argostoli, mais n'exclut pas, à notre avis, le rôle des chutes d'eau dans la détermination du sens général de la circulation hypogée.

Ainsi l'île de Céphalonie constitue un cas privilégié pour l'étude des phénomènes et du fonctionnement hydrologique d'interface eau douce / eau marine dans un karst profond particulièrement développé dans un contexte néotectonique.

## VI - CONCLUSION : DIVERSITÉ DES PROBLÈMES ET ESSOR DES RECHERCHES

Les besoins en eau sur les littoraux méditerranéens suscitent un grand intérêt pour le captage des sources sous-marines et justifient de nombreuses recherches (É GILLI *et al.*, 2004). La télédétection infra-rouge et les mesures de température et de salinité ont permis de localiser de nombreuses émergences, jusqu'alors ignorées. Sur les sources connues, la complexité des réseaux qui les alimentent a été mise en évidence par les investigations géophysiques et par les explorations spéléologiques.

Dans l'ensemble ces réseaux noyés sont hérités d'une longue évolution où ont interféré les variations du niveau marin, les mouvements néotectoniques, et les cycles climatiques commandant l'apport des eaux continentales, comme le montrent bien les exemples de Port-Miou, de Font Estramar et d'Argostoli.

Du fait des variations hydrologiques rapides induites par les pics d'apport des eaux continentales et l'influence des tempêtes et des courants marins, ces conduits noyés ou semi-noyés peuvent être affectés de phénomènes hydromécaniques, qui, surtout dans le cas des plateaux de molasse, peuvent se répercuter en surface : exemple sur le karst littoral des calcarénites de la péninsule salentine, de l'apparition

subite et éphémère de trous dans la plage, liés au fonctionnement des sources sous-marines (M. DELLE ROSE et M. PARISE, 2002).

Avec l'essor des explorations spéléologiques en plongée, de nombreuses observations ont été effectuées sur les concrétions et les datations isotopiques obtenues précisent les variations du niveau marin et les modalités de fonctionnement des hydrosystèmes. C'est particulièrement le cas dans les grottes marines des *covas* (calanques) dans les calcarénites miocènes de la côte SE de Majorque : vastes réseaux labyrinthiques de la Cova Genovesa (plus de 7 km) et de la Cova dell Coll. Elles contiennent de nombreuses concrétions stalagmitiques, réalisées en régime vadose, pendant les périodes des régressions marines quaternaires et aujourd'hui submergées. Les observations ont porté surtout sur les excroissances d'origine biogénique sur les spéléothèmes (POS = *phreatic overgrowths on speleothems*) marquant les phases de stabilité du niveau marin (Fig. 16). Au-dessus du plan d'eau actuel, leur position correspond à trois stades de l'interglaciaire éémien ; et au contraire, en position noyée, ces excroissances indiquent des phases de stabilité des niveaux régressifs (J.J. FORNOS *et al.*, 2002 ; P. TUCCIMEI *et al.*, 2006). De même dans deux grottes du littoral adriatique de la Croatie, une étude récente précise les séquences d'incrustation biogéniques (organismes perforants) sur les stalagmites submergées (M. SURIC *et al.* 2007).

Il est bon de rappeler que ces grottes marines constituent un milieu d'une grande biodiversité, et souvent un refuge pour les espèces menacées (comme les phoques de la grotte du Bue Marino en Sardaigne). Et les plongeurs ne désespèrent pas de découvrir un jour une seconde Grotte COSQUER !

**Remerciements.** : Nous avons bénéficié de multiples informations de la part de nombreux collègues, et sommes particulièrement redevable à Andrej KRANJC de Postojna, pour la documentation qu'il nous a fournie sur les *vruljés*, ainsi qu'à Éric GILLI et Bruno ARFIB qui nous ont tenu au courant de leurs travaux. Nous remercions Alain MARRE et Claude MARTIN pour leur relecture du manuscrit.



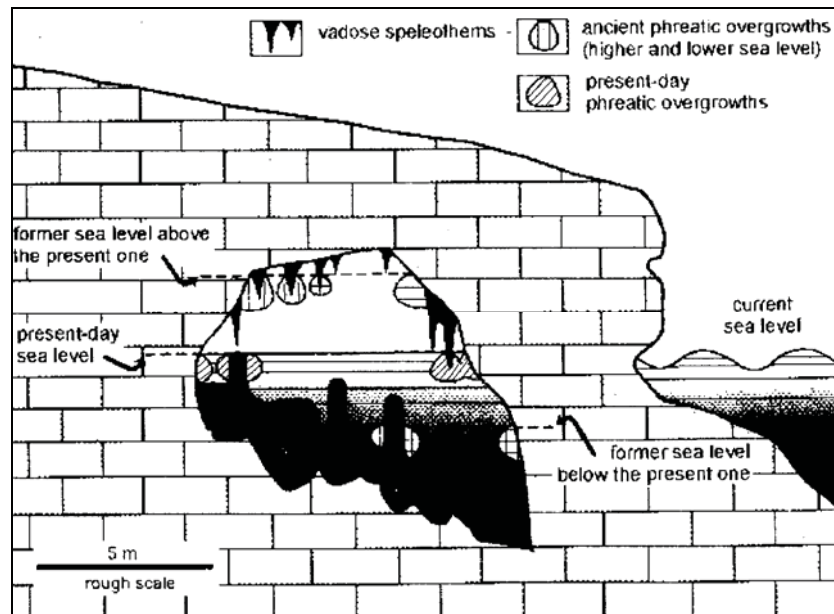


Figure 16 - Schéma d'une grotte du karst littoral de Majorque, montrant les excroissances phréatiques sur les spéléothèmes (POS = *phreatic overgrowths on speleothems*).

Les tirets marquent les hauteurs des niveaux marins. Les alignements de POS plus hauts que le niveau actuel sont en rapport avec des périodes chaudes (interglaciaire éémien), tandis que les plus bas représentent les stades de périodes froides (P. TUCCIMEI *et al.*, 2006, fig. 1).

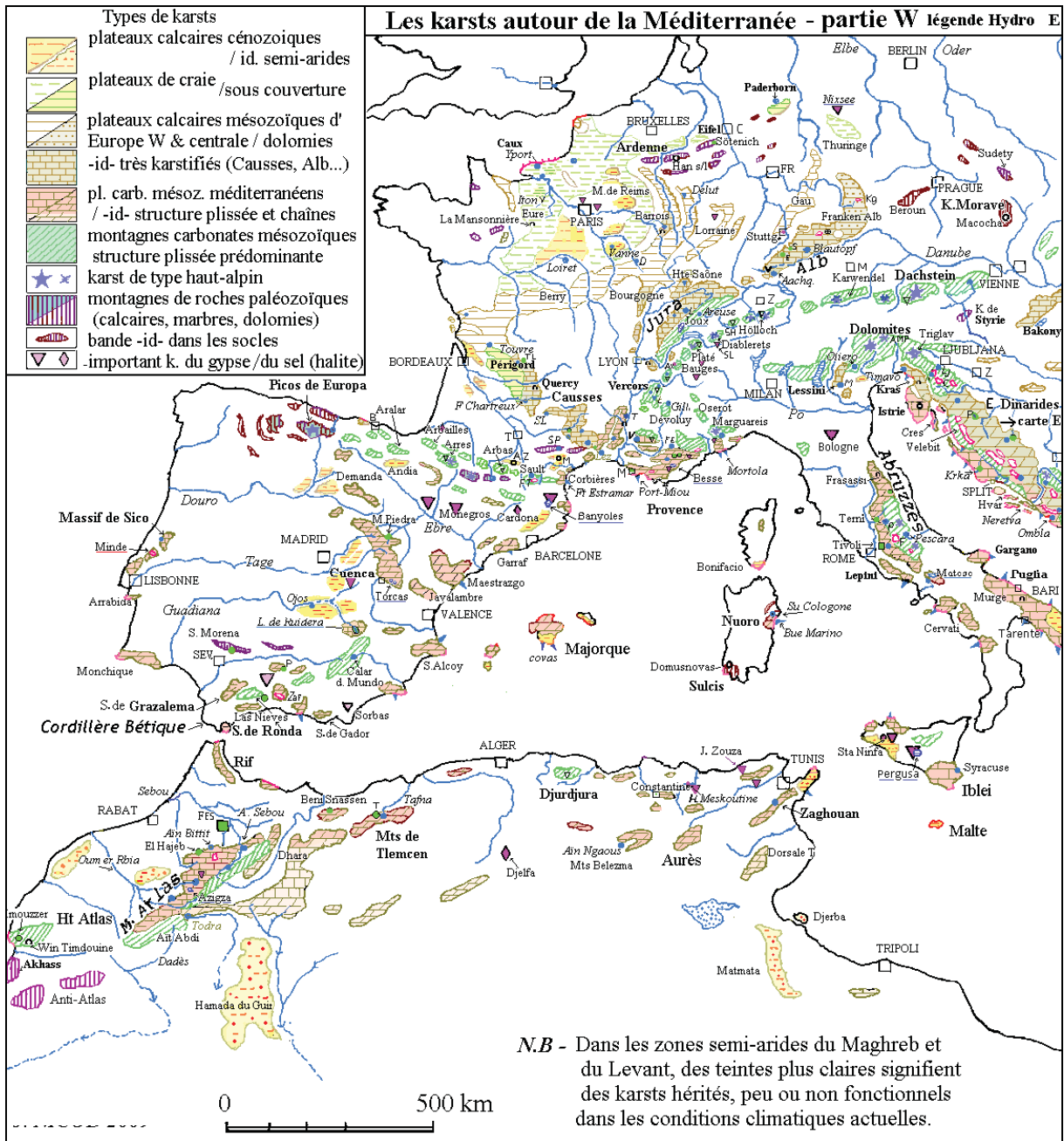
## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBERT M., AMBERT P., MAURIN C. et THOMMERET J. (1978) - Rivages post-romains de la vallée de l'Aude. *Bulletin de la Société d'études des sciences naturelles de Béziers*, vol. 47, p. 74-78.
- ARFID B., MARSILY G. de et GANOULIS J. (2002) - Les sources karstiques côtières en Méditerranée ; étude de la pollution saline de l'Almyros d'Héraklion (Crète), observations et modélisation. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, vol. 133, n°3, p. 245-253.
- ARFIB B., CAVALERA B. et GILLI É. (2006) - Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion saline en aquifère karstique côtier. *C. R. Géoscience*, vol. 338, p. 757-767.
- BAUER E.W. (1971) - Les secrets du monde souterrain. Édit. FLAMMARION, Paris, 128 p.
- BÈZES C. et JOSEPH C. (1983) - Explicitation de la relation débit/niveau de la mer d'une émergence karstique littorale par corrélation multiple avec la surface piézométrique : source d'Almyros Agios Nikolaos (Crète). *Karstologia*, n°2, p. 41-44.
- BLAVOUX B., GILLI É. et ROUSSET C. (2004) - Alimentation et origine de la salinité de la source sous-marine de Port-Miou (Marseille-Cassis). Principale émergence d'un réseau hérité du Messinien. *C. R. Géosciences*, vol. 336, p. 523-533.
- BLEAHU M.D. (1974) - *Morfologia Carstica*. Édit. Stintifica, Bucarest, 590 p.
- BOLANZ J.J. et GIANNOPOULOS V. (1997) - Vouliagmeni : bilan des explorations. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Congress of Speleology*, La Chaux-de-Fonds, vol. 4, p. 76-77.
- BONACCI O. (1987) - *Karst Hydrology*. Édit. Springer-Verlag, 184 p.
- BOUSQUET B. (1974) - *La Grèce occidentale. Interprétation géomorphologique de l'Épire, de l'Acarnanie et des îles ioniennes*. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris IV, publiée en 1976 par l'Atelier de reproduction des thèses de l'Université Lille III, Librairie Honoré CHAMPION, PARIS, 585 p. + cartes HT.
- BREZNIK M. (1973) - The Origin of Brackish Springs and their development. *Razprave Geologija Porocila*, Ljubljana, p. 83-186.
- BRGM (1982) - *Carte géologique Leucate au 1/50000*. Édit. BRGM, Orléans, feuille XXV-

- 47, avec notice (hydrogéologie par J.P. MARCHAL).
- BURDON D.J. (1965) - Hydrogeology of some karstic areas of Greece. In : *Hydrologie des roches fissurées*, colloque de Dubrovnik (1965), Édit. AIHS -UNESCO, p. 308-317.
- CALVET M. (1992) - Aplanissements sur calcaires et gîtes fossilifères karstiques. L'exemple des Corbières orientales. *Tübinger geog. Studien*, vol. 109, p. 37-43.
- CALVET M. (1999) - Régime des contraintes et volumes de relief dans l'est des Pyrénées. *Géomorphologie*, n° 3, p. 253-278.
- DELLE ROSE M. et PARISE M. (2002) - Karst subsidence in South-Central Apulia, S Italy. *International Journal of Speleology*, vol. 31, n° 1/4, p. 181-199.
- DE WAELE J. (2004) - Geomorphologic evolution of a coastal karst: the Gulf of Orosei (south-east of Sardinia). *Acta carsologica*, vol. 93, n° 2, p. 27-53.
- DOBRILLA J.C. (1991) - Plongées spéléol. en Lybie. *Scialet 20*, CDS, Isère, p. 141-162.
- DROGUE C. et SOULIOS G. (1988) - Absorption massive d'eau de mer et rejet d'eau saumâtre dans l'île karstique de Céphalonie (Grèce), nouvelle interprétation du phénomène. *C.R. Acad. Sc. Paris*, vol. 307, série II, p. 1833-1836.
- DUBOUL-RAZAVET C. et MARTIN R. (1981) - La sédimentation holocène de trois étangs du littoral du Languedoc-Roussillon. *Bull. Soc. Languedocienne de Géographie*, vol. 15, n° 1-2, p. 69-85.
- DUROZOY G. et PALOC H. (1967) - Recherches sur les ressources en eaux karstiques sur le littoral méditerranéen français. *Symposium de Haïffa*, AIHS, Publ., n° 72, p. 457-465.
- FORD D.C. et WILLIAMS P.W. (1989) - *Karst Geomorphology*. Édit. UNWIN HYMAN, Londres, 601 p.
- FORNOS J.J., GELABERT B., GINÉS A., GINÉS J., TUCCIMEI P. et VESICA P. (2002) - Phreatic overgrowths on speleothems : an useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of eastern Mallorca (Balearic Islands). *Geodinamica Acta*, vol. 15, p. 113 -125.
- FORTI P. et ROSSI G. (1991) - Idrogeologia ed evoluzione carsica della Codula di Luna (Sardegna). *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"*, Trieste, vol. 30, p. 53-79.
- GAȘTESCU P. et BREIER A. (1975) - Les lacs littoraux roumains, particularités hydriques, modifications anthropiques et leur utilisation. *VI<sup>ème</sup> Colloque de Géographie franco-roumain*.
- GEMITI F. (2004) - Le Sorgenti Sardos e l'approvvigionamento idrico della Provincia di Trieste. *Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan"*, Trieste, vol. 39, p. 67-80.
- GILLI É. (1999) - *Eaux et rivières souterraines*. Presses Universitaires de France, collection "Que sais-je ?", Paris, 127 p.
- GILLI É. (2002) - Inventaire des émergences sous-marines des Alpes-Maritimes et captage expérimental de Cabbé. *Karstologia*, n° 40, p. 1-12.
- GILLI É., MANGAN C. et MUDRY J. (2004) - Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications. Édit. DUNOD, collection "Sciences Sup.", Paris, 303 p.
- KAREH R. (1967) - Les sources sous-marines de Chekka (Liban N) ; exploitation d'une nappe karstique captive à exutoires sous-marins. *Hannon*, Beyrouth, vol. II, p. 35-59.
- KOSA P. (1977) - Hydrological problems of the Ayn Zayana Karst System. *Proceedings 7<sup>th</sup> International Speleological Congress* (Sheffield), p. 277.
- LASCU C., POPA P., SÂRBU Ș. (1994/95) - Le Karst de Movile (Dobrodgea de Sud) ; *Rev. Roumaine de Géographie*, vol. 38, p. 85-94, vol. 39, p. 31-40.
- MAIRE R. (1990) - *La haute montagne calcaire*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Nice, publié dans "Karstologia Mémoires", n° 3, 731 p.
- MARTEL E.A. (1922) - *Nouveau traité des eaux souterraines*. Édit. DOIN, Paris, 579 p.
- MAURIN V. et ZÖTL J. (1960) - *Karsthydrologische Aufnahmen auf Kephallenia (Ionische Inseln)*. Steirische Beiträge zum Hydrogeologie, Graz, H.1, 52 p. + 3 cartes HT.
- MAURIN V. et ZÖTL J. (1965) - Salt water encroachment in the low altitude karst water horizons of the Island of Kephallinia. In : *Hydrologie des roches fissurées*, colloque de Dubrovnik (1965), Édit. AIHS -UNESCO, p. 423-438.

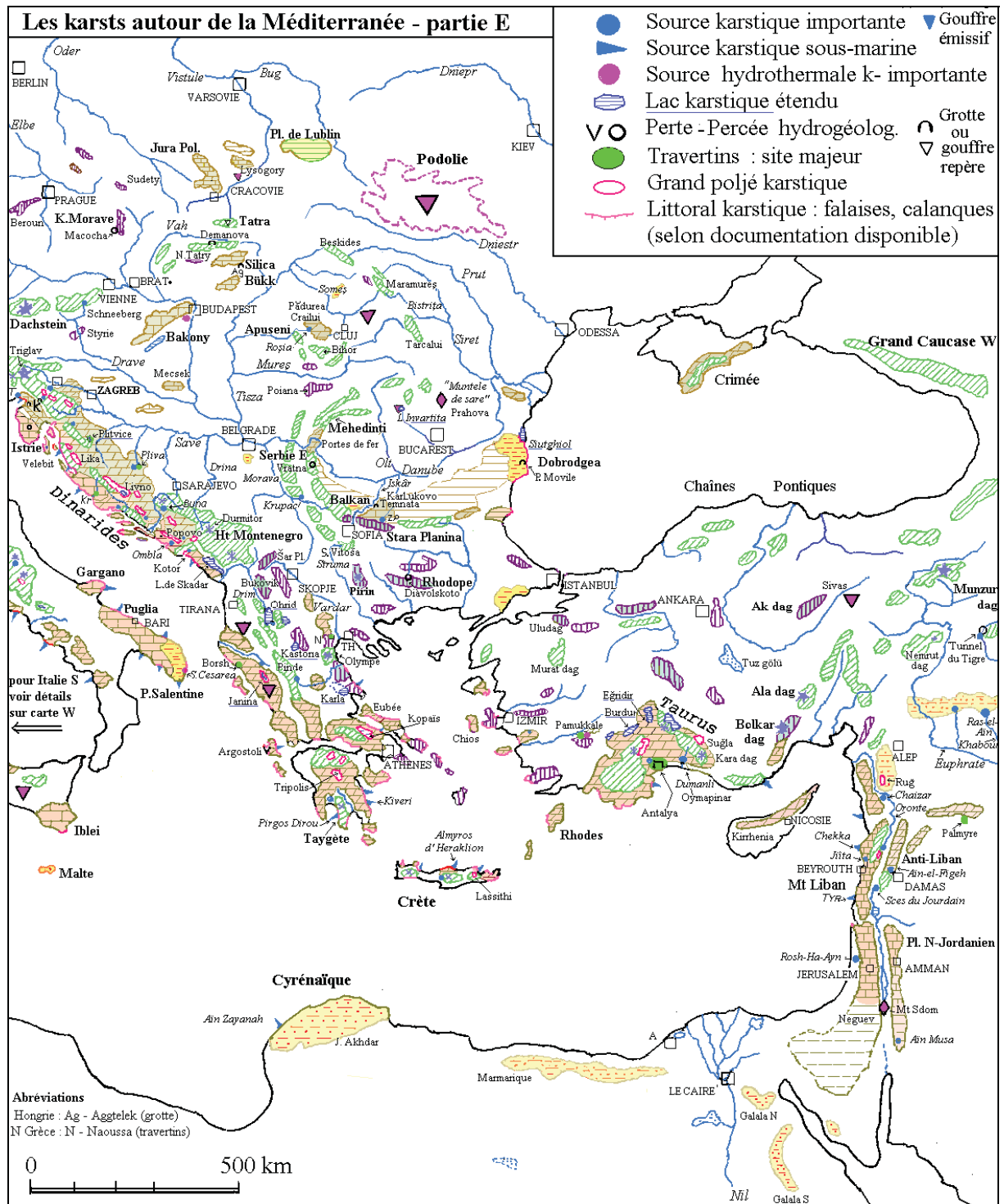
- MIJATOVIĆ B. (2005) - The groundwater discharge in the Mediterranean karst coastal, zones and freshwater tapping; problems and adopted solutions – case studies. *Int. Conference Water Resources and Environmental Problems in Karst – CVIJIC*, Beograd-Kotor, p. 259-266.
- MIJATOVIĆ B., TOMIĆ V et STEVANOVIĆ-KLJAIĆ B. (2005) - Hydrogeological conditions of the fresh water tapping of karst aquifer system in gulf of Kotor. *Int. Conference Water Resources and Environmental Problems in Karst – CVIJIC*, Beograd-Kotor, p. 341-348.
- MILANOVIĆ S. (2005) - Hydrogeological characteristics of some deep siphonal springs in Serbia and Montenegro karst. *Int. Conference Water Resources and Environmental Problems in Karst – CVIJIC*, Beograd-Kotor, p 451-458.
- MOULLARD L., MIJATOVIĆ B., KAREH R et MASSAAD B. (1965) - Exploitation d'une nappe karstique captive à exutoires sous-marins. Problèmes posés et solution adoptée sur la côte libanaise. *In: Hydrologie des roches fissurées*, colloque de Dubrovnik (1965), Édit. AIHS -UNESCO, vol. I, p. 237-250.
- NICOD J. (1977) - Les plateaux calcaires de la Dobrodgea méridionale et les problèmes du karst profond. *Norois*, vol. 95 bis, p. 205-212.
- NICOD J. (2000) - Sources et hydrosystèmes karstiques des régions arides et semi-arides, essai géographique. *Karstologia*, vol. 35, p. 47-58.
- NICOD J. (2003) - *Les karsts Dinariques, paysages et problèmes*. Édit SAZU, Ljubljana, et *Karstologia Mémoires*, n° 10, 183 p.
- NICOLESCU M. (1965) - Rorul tectonicii in circulacia si gasirea apei in carstul din Dobrodgea. *Hidrotehnika Gospodarirea Apelor, Meteorologia*, vol. 10, n° 1.
- PFEFFER K.H. (1975) - Zur Genese von Oberflächenformen in Gebieten mit flachlagernden Carbonatsteinen. *F. Steiner V.* (Wiesbaden), ch. 2, Cyrenaïka, p. 105-142.
- PIRAZZOLI P.A., STIROS S.C., LABOREL J., LABOREL-DEGUEN F., ARNOLD M., PAPA-GEORGIU S. et MORHANGE C. (1994) - Late-Holocene shoreline changes related to palaeoseismic events in the Ionian Islands. *The Holocene*, vol. 4, n° 4, p. 397-405.
- POTIÉ L. (1974) - Captage des résurgences sous-marines d'eau douce : un barrage expérimental à Port-Miou. *Rapport international SRPM. Société des Eaux de Marseille*, 74 RT 2001 PM.
- SALVAYRE H. (1974) - Contribution à l'étude des résurgences de Font Estramar, Font-Dame (Massif des Corbières, Pyrénées orientales). *Phénomènes Karstiques* (II), Mémoires et Documents du CNRS, vol. 15.
- SALVAYRE H. (2002) - Le karst des Corbières d'Opoul. Données récentes sur un karst méditerranéen actif. *Spelunca*, n° 85, p. 43-49.
- SURIĆ M. (2002) - Submarine karst of Croatia – evidence of former lower sea levels. *Acta carsologica*, vol. 31/3, n° 5, p. 89-98.
- SURIĆ M., JALŽIĆ B. et PETRICIOLI D. (2007) - Submerged speleothems – Expect the unexpected examples from the eastern Adriatic coast (Croatia). *Acta carsologica*, vol. 36, n° 3, p. 389-396.
- TUCCIMEI P., GINÉS J., DELITALA M.C., GINÉS A., GRÀCIA F., FORNÓS J.J. et TADDUCCI A. (2006) - Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeit. für Geomorph. N.F.*, vol. 50, n° 1, p. 89-98.
- VERLAQUE C. (1981) - La mise en valeur des étangs littoraux du Languedoc-Roussillon. *Bull. Soc. Languedocienne de Géographie*, vol. 15, n° 1-2, p. 137-153.

Annexe 1-a - Les karsts d'Europe moyenne autour de la Méditerranée occidentale.



<p><b>Abréviations France</b></p> <p><b>Sources :</b>  <i>Ax</i>-Aix-les-Bains. <i>FE</i>-Fontaine-l'Evêque.  <i>D</i>-Douix de Châtillon. <i>FP</i>-Frais-Puits.  <i>FT</i>-Fontestorbes. <i>Gill.</i>-Gillardes. <i>L</i>-Loue.  <i>Ł</i>-Luire. <i>T</i>-Tourne de Bourg-St-Andéol.  <i>SA</i>-Salles la Source. <i>SP</i>-Saint-Pons.  <i>V</i>-Fontaine de Vaucluse. <i>V</i>-Vis.</p> <p><b>Tunnels naturels :</b>  <i>M</i>-Minerve, <i>MA</i>-Mas d'Azil.  <i>TL</i>-Travertins de St.-Cernin-de-Larche.</p>	<p><b>Autres abréviations</b></p> <p><b>Allemagne, Alb :</b>  <i>E</i>-Travertins de l'Echaz. <i>S-Trav.</i> Seeburg.  <i>Kg</i>- Poljé de Königstein. ⊕ Maar Steinheim.</p> <p><b>Suisse, Alpes :</b>  <i>Alpes</i> : <i>SH</i>-Siebenhengste. <i>SL</i>-Karst du gypse de St.-Léonard.</p> <p><b>Italie :</b>  <i>AMP</i>- Alto Ampezzani. <i>F</i>- Fucino. <i>M</i>-Montorio (Vérone). <i>P</i>-Fontaine de Peschiera.</p> <p><b>Slovénie :</b>  <i>C</i>-Poljé de Cerknica. <i>Lj</i>-Ljubljana.</p>	<p>Les annexes 1-a et 1-b présentent des documents provisoires.</p> <p>Les cartes définitives, accompagnées d'une notice où seront indiquées les références bibliographiques, seront publiées dans <i>Karstologia</i>.</p>
--	---	--

## Annexe 1-b - Les karsts d'Europe moyenne autour de la Méditerranée orientale.



Remarque : Ces cartes ont pour but de localiser les unités et les sources karstiques, de visualiser leur répartition et de mettre en évidence la variété des plateaux et des massifs. L'étendue des unités est calquée sur les affleurements carbonatés. La typologie retenue combine les indications structurales, les données géomorphologiques et le contexte bioclimatique, avec des simplifications inévitables vu l'échelle de la carte. Dans les karsts de plateaux on a pu tenir compte de la lithologie et du style tectonique tabulaire ou plissé, les teintes plates soutenues signifiant les zones karstiques les plus caractéristiques par la densité de leurs formes de surface et souterraines. Les karsts des évaporites, d'étendue trop restreinte, ne sont figurés que par des signes. On n'a pu indiquer que les sources les plus connues et les poljés les plus étendus.