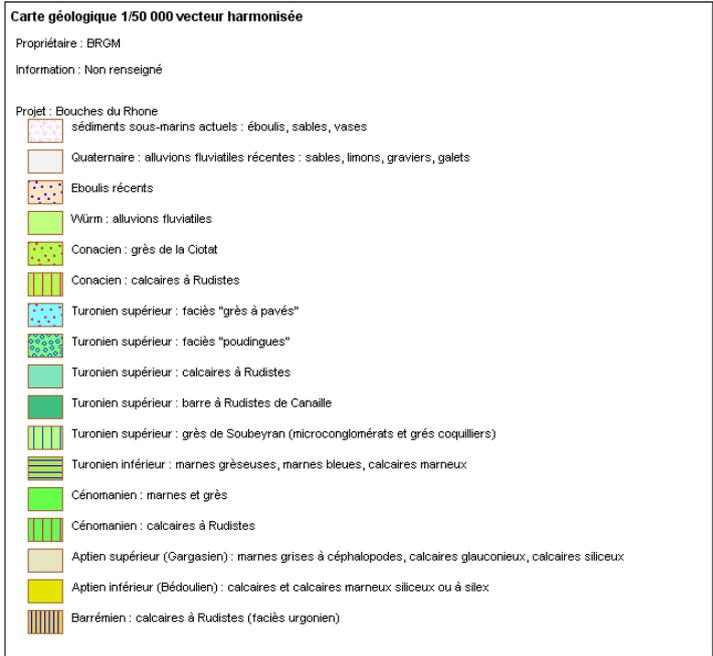
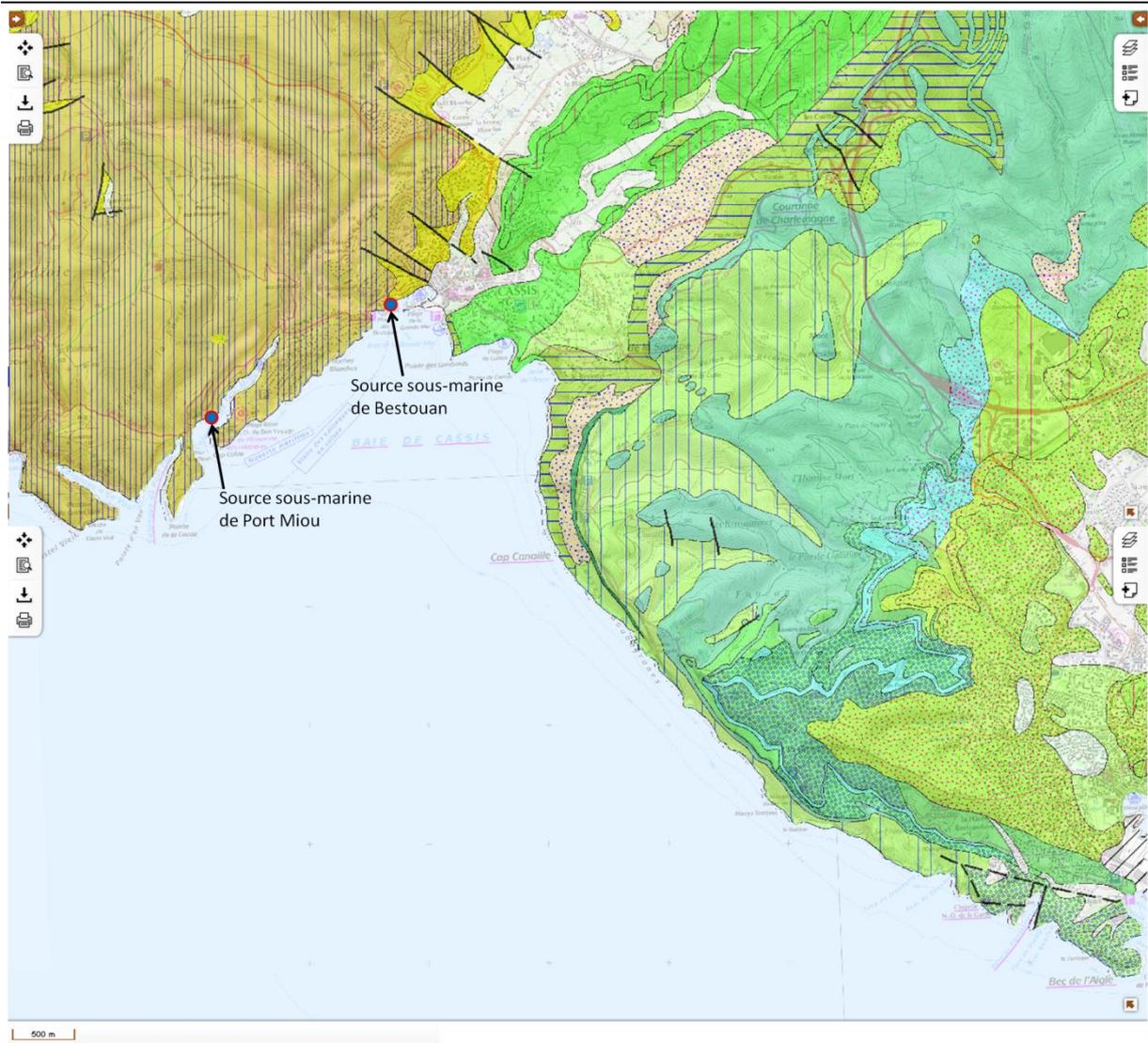


Carte géologique 1/250 000 BRGM



Carte géologique 1/50 000 Marseille-Aubagne. BRGM.
www.infoterre.fr – consulté le 09/02/12

Interprétation géologique du panorama nautique de Port Miou (Cassis) au Bec de l'Aigle (La Ciotat)

par
Marc Floquet*

*Aix-Marseille Université (AMU) - CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement) - "Systèmes et Réservoirs Sédimentaires" - UMR 7330 CNRS / AMU, Centre Saint-Charles, 3 place Victor Hugo, Case 67, 13331, Marseille, Cedex 03, France - marc.floquet@univ-amu.fr ; floquet@cerege.fr

L'interprétation géologique des paysages vus depuis la mer suivant un trajet menant de Port Miou - Cap Cable jusqu'au Bec de l'Aigle, c'est-à-dire de Cassis à La Ciotat, est donnée grâce à 5 figures, représentant :

- la situation du trajet nautique suivi, sur un cadre paléogéographique (au Turonien supérieur, soit à environ -89 Ma) = **figure 1** ;

- un panorama pris depuis les anciennes carrières de Notre Dame de Bon Voyage et montrant la série sédimentaire comprise entre les calcaires blancs sommitaux (d'âge Barrémien) du complexe urgonien et les calcaires quartzeux roux des falaises soubeyrannes (Cap Canaille) d'âge Turonien supérieur = **figure 2** ;

- des panoramas aériens des falaises soubeyrannes, habillés de manière à ce que soient distincts les empilements de *sand waves* de calcarénites quartzieuses rousses de bassin, et les écoulements gravitaires de débris de calcaires blancs à rudistes de plate-forme = **figure 3** ;

- des panoramas, aérien et terrestre, depuis la Grand Tête et le Sémaphore du Bec de l'Aigle jusqu'à la baie de la Ciotat, habillés et interprétés, montrant comment les paléodeltas d'âge Crétacé supérieur du secteur de La Ciotat nourrissaient en silicoclastiques le Bassin Sud-Provençal, et comment les écoulements gravitaires (débrites) issus de la Plate-Forme Carbonatée venaient buter contre les *bottomsets* des paléodeltas = **figure 4** ;

- un schéma interprétatif, indiquant les divers processus sédimentaires (écoulements gravitaires évolutifs, de la brèche de pente à la déstabilisation deltaïque, et de la coulée de débris à la mégaturbidite) impliqués dans l'architecture du remplissage sédimentaire du Bassin Sud-Provençal = **figure 5**.

Mise à part la figure 2 qui est un panorama inédit, toutes **les autres figures sont extraites des ouvrages cités ci-dessous** et auxquels le lecteur devra se reporter pour de plus amples informations.

FLOQUET, M. & HENNUY, J. (2001) - Anatomy of resedimented carbonates in the latest Turonian - earliest Coniacien South-Provençal Basin. *Géologie Méditerranéenne*, XXVIII, 1-2, p. 67-71.

FLOQUET, M. & HENNUY, J. (2003) - Evolutionary gravity flow deposits in the Middle Turonian - Early Coniacien Southern Provence Basin (SE France) : origins and depositional processes. *In* : Advances in Natural and Technological Hazards Research, Submarine Mass Movements and Their Consequences, Locat J. & Mienert J. Eds, Kluwer Academic Publishers Bookseries, vol. 19, p. 417-424, 3 fig.

HENNUY, J. (2003) - Sédimentation carbonatée et silicoclastique sous contrôle tectonique, le bassin Sud-Provençal et sa plate-forme carbonatée au Turonien moyen au Coniacien moyen. Evolutions séquentielle, diagénétique, paléogéographique. *Thèse de doctorat*, Université de Provence, 252 p., 42 pl.

FLOQUET M., GARI J., HENNUY J., LÉONIDE P. & PHILIP. J. (2005) - Sédimentations gravitaires carbonatées et silicoclastiques dans un bassin en transtension, séries d'âge cénomanien à coniacien moyen du Bassin Sud-Provençal. *Livret guide d'excursion géologique, 10^{ème} Congrès Français de Sédimentologie*, Giens 14-15 octobre 2005, Publ. ASF, Paris, n° 52, 80 p., 14 fig., 22 pl.

Figure 1 - Le trajet nautique de Port Miou (Cassis) au Bec de l'Aigle (près de la Ciotat), replacé (trait rouge) sur le cadre paléogéographique du Bassin Sud - Provençal au Turonien et au Coniacien inférieur. La Plate-Forme Carbonatée, dépendance septentrionale du Bassin Sud-Provençal *sensu stricto*, était limitée au Nord par le Bombement Durancien et au Sud par le Massif Méridional (MM). In Floquet *et al.*, 2005, tiré de Hennuy, 2003.

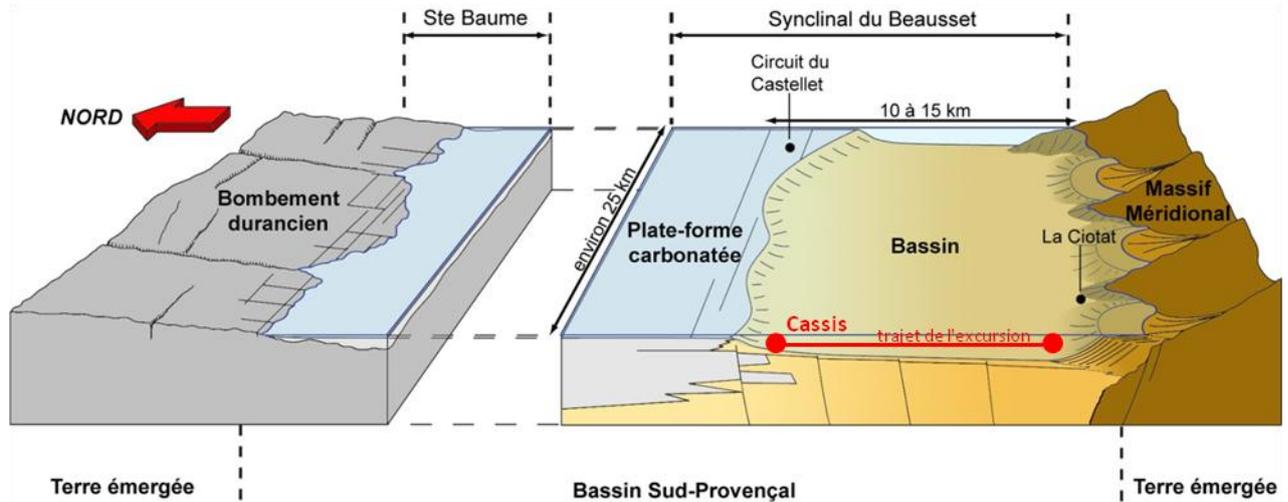


Figure 2 - Panorama pris depuis Notre Dame de Bon Voyage près de Port Miou, depuis les dalles des calcaires blancs sommitaux (d'âge Barrémien) du complexe urgonien, vers le Nord, le Nord-Est et l'Est, sur les calcaires et marnes d'âge Aptien (vallée dans le prolongement de la Baie de Cassis, puis sur les calcaires quartzeux et calcaires argileux et silto-quartzeux d'âge Cénomaniens inférieur-moyen à Turonien inférieur-moyen, et enfin sur les calcaires quartzeux roux et les calcaires blancs du Cap Canaille d'âge Turonien moyen supérieur. Clichés N. & M. Floquet.



Figure 3 - Panoramas aériens des Falaises Soubeyrannes (les successifs indices A et RSC sont les repères des unités sédimentaires telles que décrites par Hennuy, 2003 et Floquet *et al*, 2005)

1 - Série complète depuis A1 jusqu'à A5. Les limites entre chaque unité sont représentées en rouge. Les plus gros olistolithes des unités de resédimentation carbonatées et terrigènes sont entourés de vert.

Les unités de couleur rousse sont les unités calcarénitico - quartzieuses autochtones A. A2 est épaisse d'environ 170 m.

Les unités de couleur plus claires sont les RSC. RSC1 se termine en biseau au Sud. RSC2 est épais d'environ 80 m, contient de très nombreux olistolithes de grandes tailles et se termine aussi en biseau au SE. RSC3 est discontinue. Une grande cicatrice d'arrachement est visible juste au Sud du belvédère. Sous le sémaphore le sommet de RSC3 est irrégulier car repris sous forme d'olistolithes dans RST3. RSC4 est aussi discontinue et repose en biseau sur d'importantes masses de poudingues de RST3.

Les unités de couleur beige - roux, surtout localisées au SE du panorama sont les RST1 et RST2 qui présentent des discordances angulaires avec les unités A et RSC. RST3 épaisse 80 m est très irrégulière et forme des reliefs sur lesquels RSC4 repose en biseau, sans pouvoir les recouvrir.

2 - Détails des RSC, depuis le belvédère jusqu'au sémaphore. Les plus gros olistolithes de RSC2 sont visibles. RSC3 a son épaisseur doublée à droite du Belvédère où elle est reprise en olistolithes dans le premier ensemble de RST3.

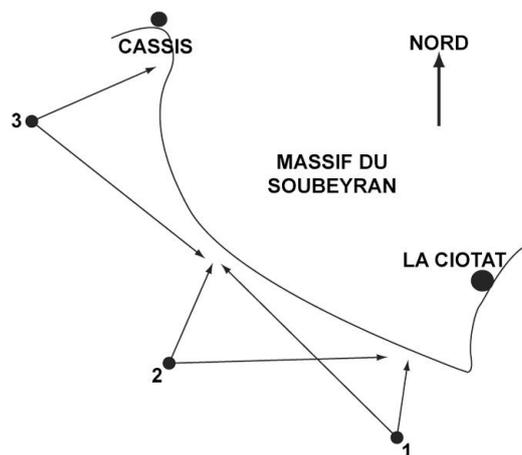
3 - Unités inférieures de la série :

Sous A1, la discontinuité de base D0 est représentée en rouge.

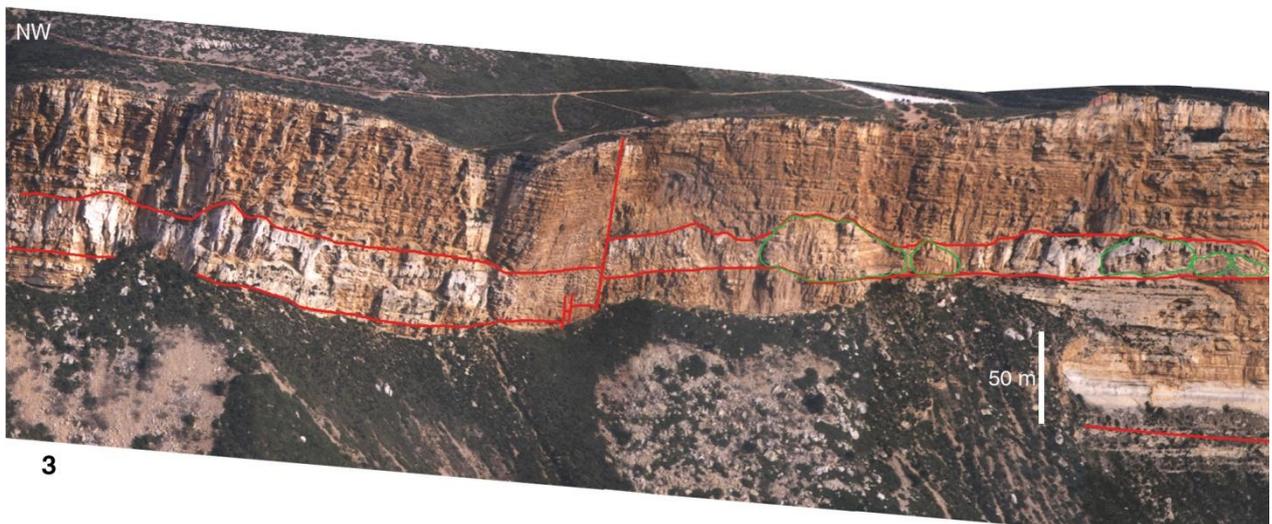
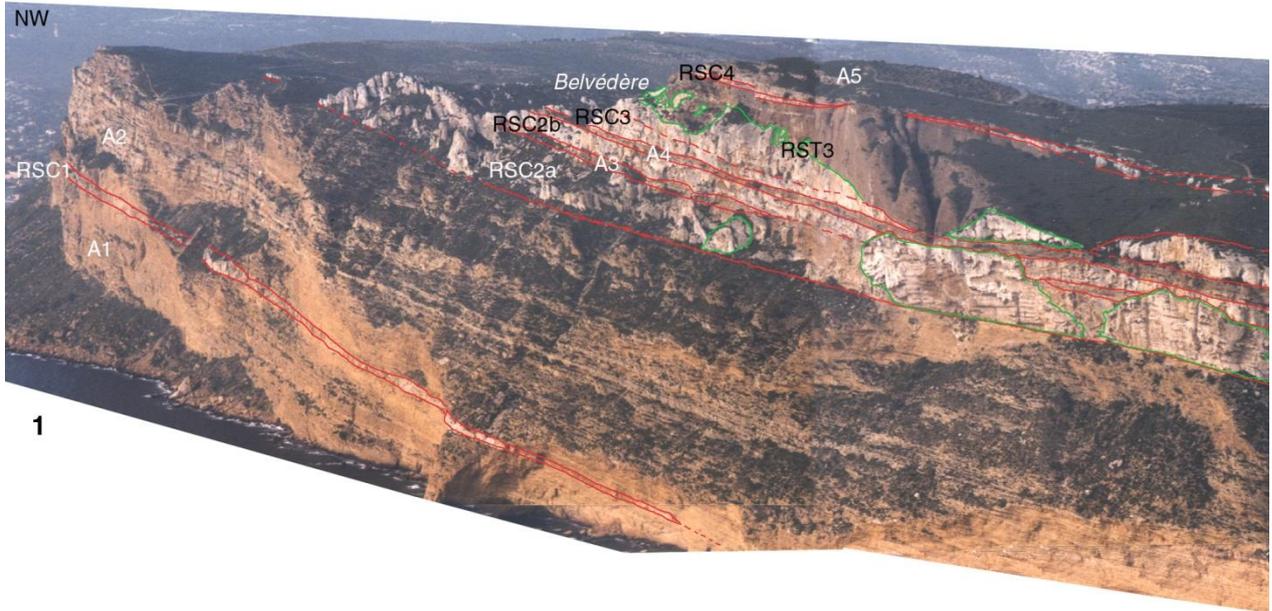
Les deux ensembles de A1 se distinguent bien : le premier ensemble plus marno - quartzieux apparaît plus clair, le deuxième ensemble calcarénitico - quartzieux (qui augmente d'épaisseur vers le Sud). apparaît plus roux

RSC1 est ici épaisse et à olistolithes alors qu'elle est réduite au Sud (photographie 1).

Dans la partie nord du panorama, deux petites failles synsédimentaires de RSC1 sont visibles à proximité d'une grande faille plus récente affectant toute la série.



Localisation approximative des trois points à partir desquels les clichés aériens
des trois panoramas ont été pris.



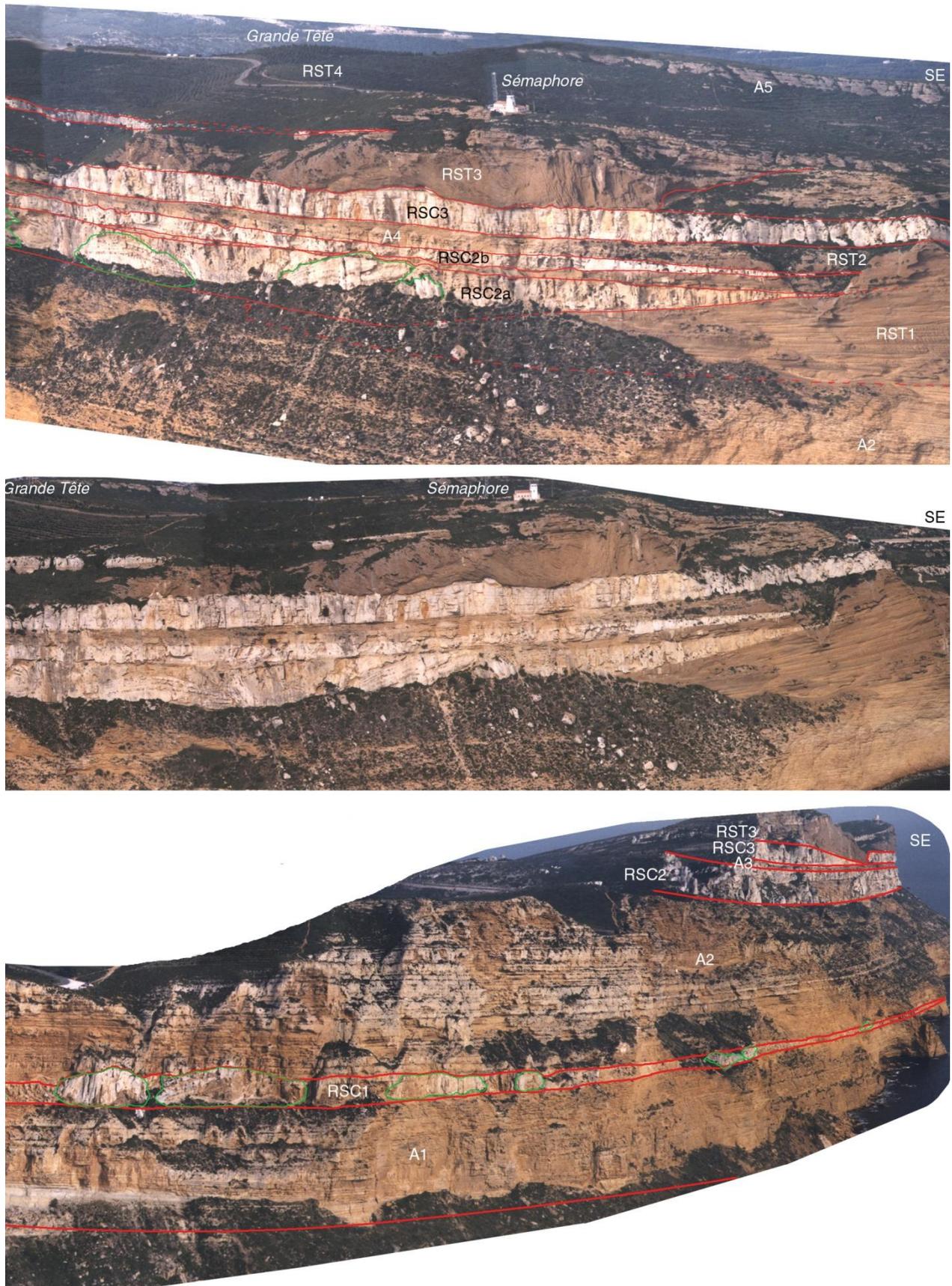


Figure 4 - Panorama depuis le sémaphore : «onlaps turbiditiques» carbonatés sur les édifices deltaïques (les successifs indices A et RSC sont les repères des unités sédimentaires telles que décrites par Hennuy, 2003 et Floquet *et al*, 2005).

- 1 - Panorama aérien des falaises comprises entre le Bec de l'Aigle au SE et le sémaphore au NW. S'observent en particulier :
- la discordance angulaire entre l'ensemble unité autochtone A2 plus zone de transition A2-RST1 et les unités de resédimentation d'origine deltaïque RST1 à RST3 ;
 - les variations de pendage (traits rouges arqués) au sein de RST1 correspondant au passage des *foresets* (au SE) vers les *bottomsets* (au NW) ;
 - les biseaux des mégaturbidites carbonatées RSC2a, RSC2b, RSC3 (flèche rouge) et RSC4 (flèche rouge) venant du Nord, contre la morphologie de pente de *foresets* de RST1, RST2 et RST3. Au cours du temps ces biseaux se sont faits de plus en plus vers le SE. Ainsi, les biseaux de RSC2a et b sont à l'aplomb du sémaphore (coin supérieur gauche de la photographie), celui de RSC3 est au SE dans les environs de Saint Fréouse et celui de RSC4 est encore plus au SE ;
 - le contact oblique entre un olistolithe de l'ensemble inférieur chaotique RST3a et A4 sous le Sémaphore.

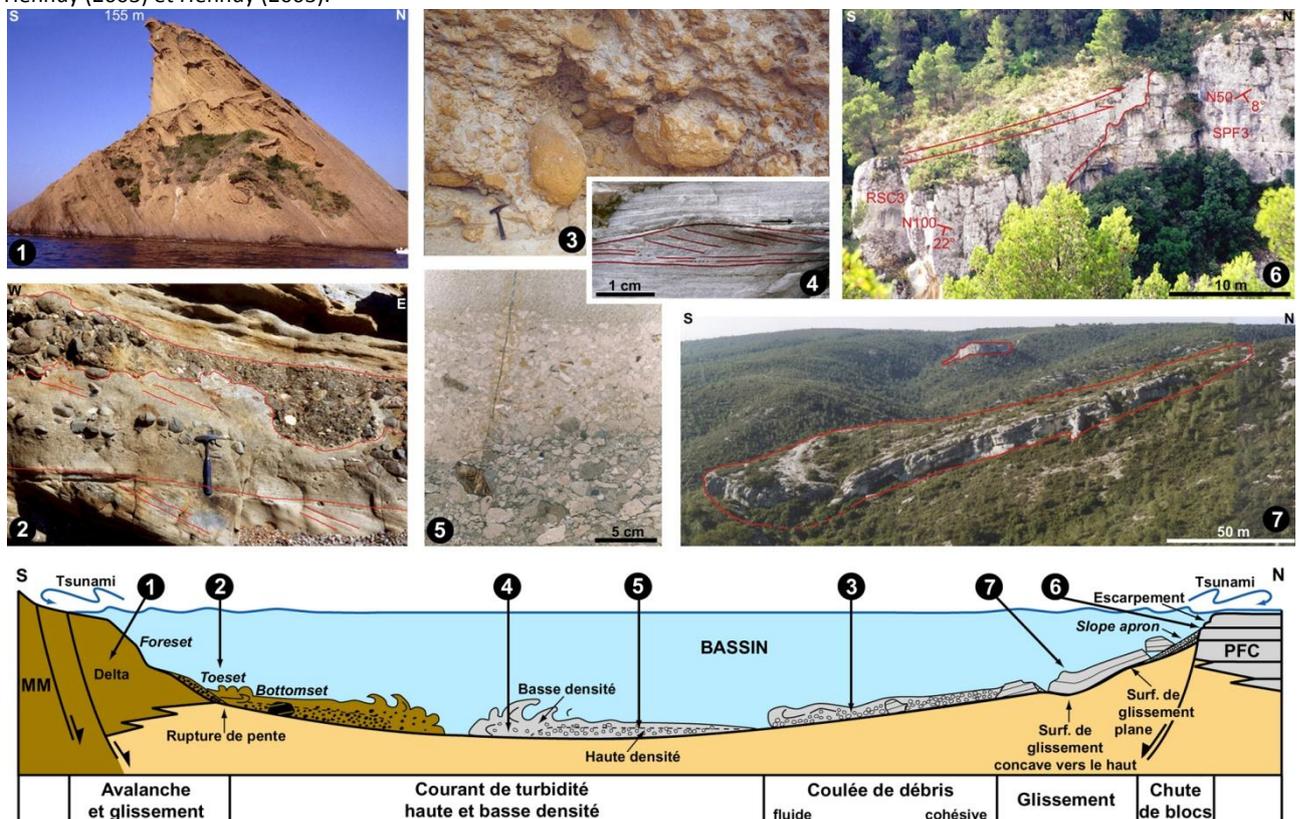
2 - Vue panoramique prise depuis le sémaphore en direction du SE, montrant les édifices deltaïques en bordure sud du BSP et les biseautages des resédimentations carbonatées RSC3 et RSC4 (flèches blanches) contre les *foresets* de ces édifices. Le biseau de RSC4 est plus au SE que celui de RSC3.

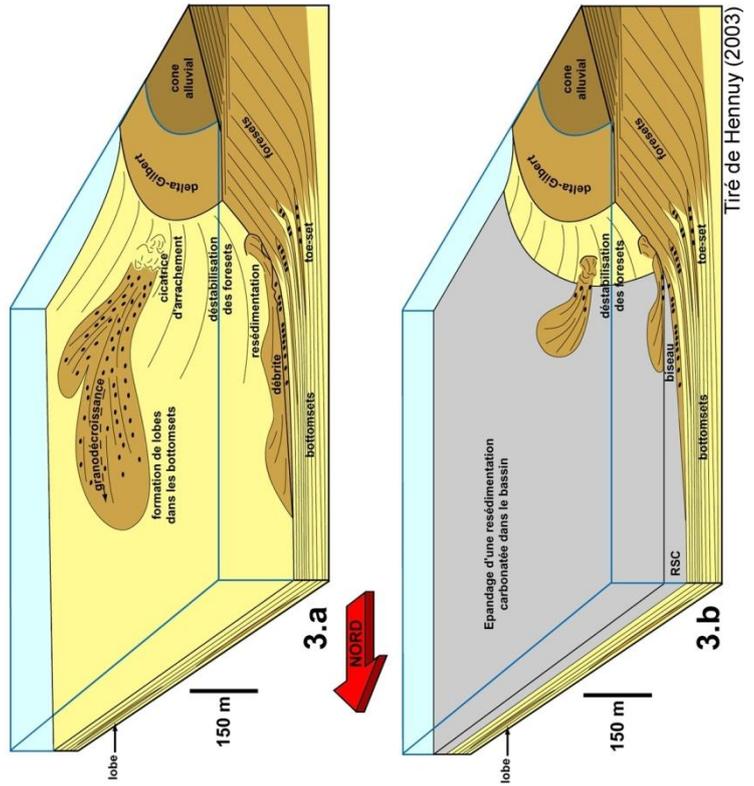
3a et b - Blocs diagrammes représentant un delta de type Gilbert et les milieux associés censés correspondre aux environnements de dépôts des unités terrigènes RST.

3a - Des déstabilisations (origine tectonique et/ou surcharge de croissance) ont pu se produire sur les *foresets* d'un tel delta, donner naissance à des arrachements et à des écoulements gravitaires silicoclastiques qui se sont accumulés en *toesets* ou plus loin en *bottomsets*. Ces écoulements gravitaires se sont faits sous forme de glissements d'olistolithes (*foresets* déjà indurés) et de courants de turbidité haute densité et de *grain-flows*, donnant les RST.

3b - Un important écoulement gravitaire carbonaté provenant de la PFC au Nord est venu napper le BSP, butant contre sa bordure sud et contre les édifices deltaïques, formant ainsi un des spectaculaires biseaux de la photographie 1. En butant contre les édifices deltaïques, cet écoulement a probablement dû en déstabiliser les *foresets*, initiant ainsi des écoulements gravitaires silicoclastiques à partir des deltas, d'où le mélange fréquent de resédimentations gravitaires carbonatées et silicoclastiques dans le Massif du Soubeyran.

Figure 5 - Images de faciès caractéristiques (1 à 7 en haut) d'écoulements sous-marins en masse dans le BSP au Turonien supérieur - Coniacien moyen et interprétations (en bas) en termes de processus de dépôts par écoulements gravitaires évolutifs. Les écoulements viennent à la fois de la marge de la PFC au Nord (à droite sur dessin) et de *fans deltas* au Sud qui bordaient le Massif Méridional émergé (MM à gauche sur dessin). Exagération verticale d'environ 6 fois. De Floquet & Hennuy (2003) et Hennuy (2003).





Tiré de Hennuy (2003)



PORT MIOU ET LE BESTOUAN, LES PLUS LONGS FLEUVES SOUTERRAINS D'EUROPE

Thomas CAVALERA, Bruno ARFIB & Éric GILLI

Eemblème de la région marseillaise, le massif côtier des Calanques abrite les importantes rivières souterraines de Port Miou et du Bestouan. Ces sources karstiques émergent au pied des falaises calcaires du Crétacé supérieur, à quelques mètres de profondeur sous le niveau marin (fig. 1). Les gigantesques galeries souterraines qui se développent en amont des exutoires dévoilent des réseaux noyés parmi les plus importants explorés en Europe.

> Deux conduits noyés plurikilométriques

À Port Miou, la galerie principale est un conduit horizontal dont la section varie entre 200 et 400 m², évoluant entre -11 et -38 m (fig. 2). Une cloche à l'air libre découverte à 530 m de l'exutoire, baptisée « cloche 500 », a constitué le site de mise en place, au cours des années 70, d'un barrage sous-marin destiné à limiter l'intrusion d'eau de mer en vue d'obtenir de l'eau douce dans la rivière [4]. À 2020 m de l'entrée, sous une cloche à l'air libre (cloche des Suisses), s'ouvre le puits terminal, que les plongeurs ont descendu par paliers successifs, jusqu'à atteindre la profondeur de -172 m NGF (fig. 3).

La source du Bestouan est un réseau noyé plus complexe. D'une section moyenne de 10 à 30 m², le conduit se réduit à quelques mètres carrés dans des zones où la turbulence devient très importante. À 2440 m de la source, une seconde galerie s'amorce avec un passage à l'air libre (galerie du Flou). La fin des explorations est marquée par un ensemble de blocs qui barrent le passage des plongeurs dans les deux galeries, à près de 3 km de l'exutoire (fig. 3).

> La karstification profonde au Messinien à l'origine de la contamination salée

L'originalité de ces cavités se trouve dans leur dimension et leur position sous le niveau de la mer. Ces deux cavités se développent dans le calcaire urgonien comme la majeure partie du massif des Calanques. Ce sont les deux seules cavités du massif ayant un développement de plusieurs kilomètres. Le puits terminal de Port Miou, atteignant au moins 170 m, est le plus profond puits du secteur. Son creusement à une telle profondeur est sans doute corrélé avec la chute importante du niveau marin au Messinien [17], constituant ainsi le niveau de base de l'écoulement dans ce karst. Aujourd'hui cette karstification à grande profondeur influence le drainage de l'aquifère, forçant l'eau douce des précipitations infiltrées dans le bassin versant à circuler au contact de l'eau de mer

envahissant l'aquifère. L'eau de mer se retrouve mélangée avec le flux d'eau douce, remontant ainsi pour former une source d'eau saumâtre [22, 55].

> Variations du mélange eau douce / eau salée selon l'alimentation

Les sources réagissent de manière synchrone aux pluies par une succession de chutes corrélées de leur salinité et de leur température. La salinité varie en sens inverse du débit total des sources. Toutefois, des différences existent ; par exemple durant l'étiage estival 2005, la source de Port Miou a eu une eau contaminée à plus de 35 % par de l'eau de mer, à comparer à 20 % d'eau de mer pour celle du Bestouan. Les travaux récents [1] [2] ont confirmé que le mélange a lieu à très grande profondeur, bien plus loin que le point le plus en amont reconnu par les plongeurs (fig. 3). Les mises en charge successives du réseau karstique de Port Miou lors des crues 2005-2006 n'ont pas d'effet sur la quantité d'eau de mer apportée initialement au mélange ; les chutes de salinité de la source sont alors essentiellement dues à l'apport au mélange d'une quantité d'eau douce supplémentaire.

L'étude hydrogéologique montre que les deux sources appartiennent au même aquifère, un bassin versant d'une superficie minimale de 400 km² (fig. 4).

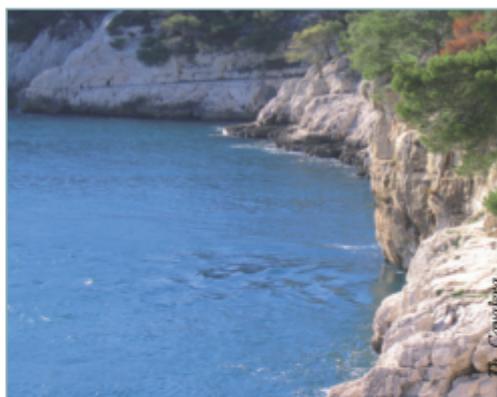


Figure 1 - La source sous-marine de Port Miou en crue, décembre 2006.

[1] ARFIB B., CAVALERA T. & GILLI E. 2006 - Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion saline en aquifère karstique côtier. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 338, p. 757-767.

[2] CAVALERA T. 2007 - *Etude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritère*, 403 p. Thèse, Marseille.

[3] DOUCHE M. 2007 - *Port Miou et le Bestouan*, <http://www.plongeesout.com> [consulté août 2007].

[4] POTE L. & RICOUR J. 1973 - Etudes et captage de résurgences d'eau douce sous-marines. *Revue technique internationale de l'eau*, p. 5-18.

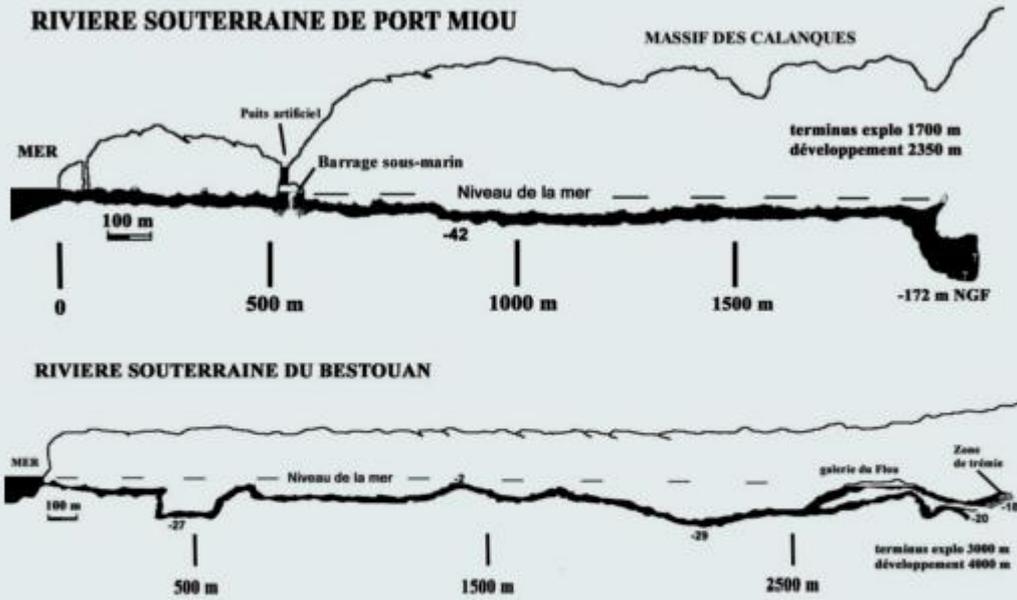
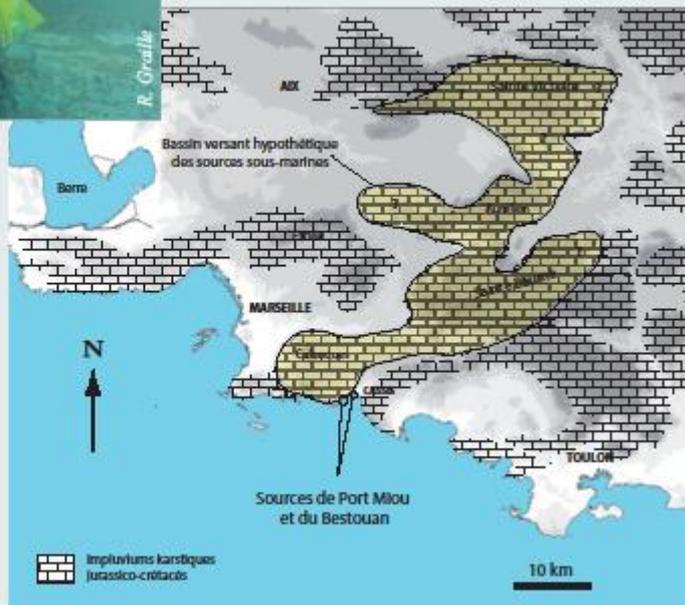


Figure 3 - Coupes développées de Port Miou et du Bestouan [modifiées d'après topographies CRPS / FFESSM - mai 1992].

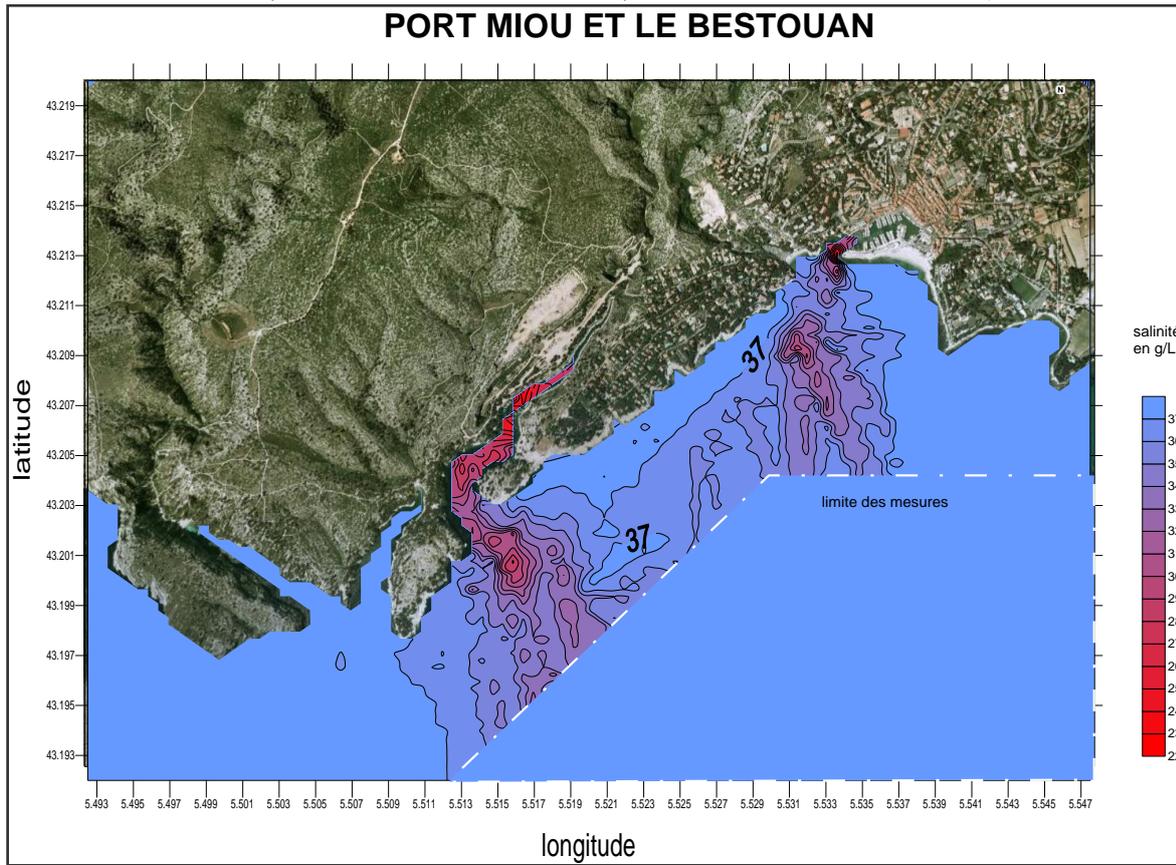


< Figure 2 - La galerie principale de la rivière souterraine de Port-Miou en amont du barrage souterrain.



> Figure 4 - Bassin versant hypothétique des sources karstiques sous-marines de Port-Miou et du Bestouan [2].

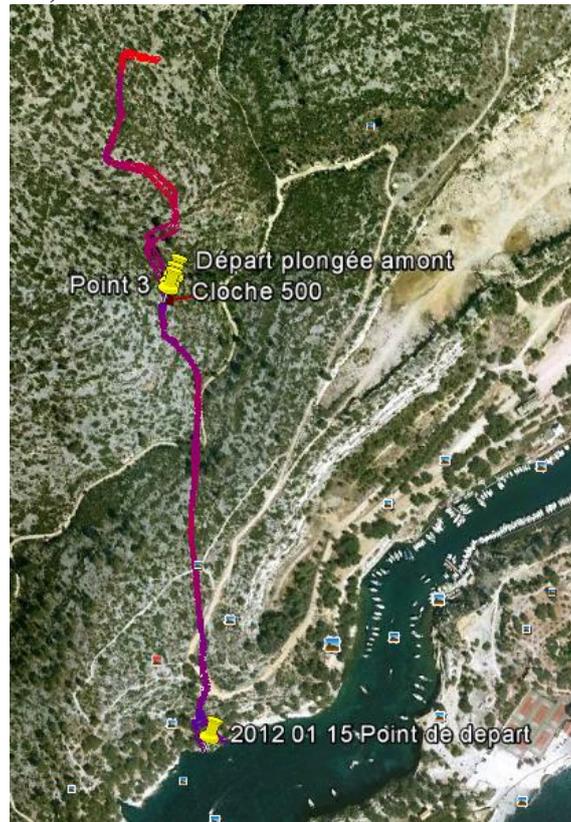
Salinité de la mer, 40 cm sous la surface, Juin 2009 - Extrait de Gilli, 2009.



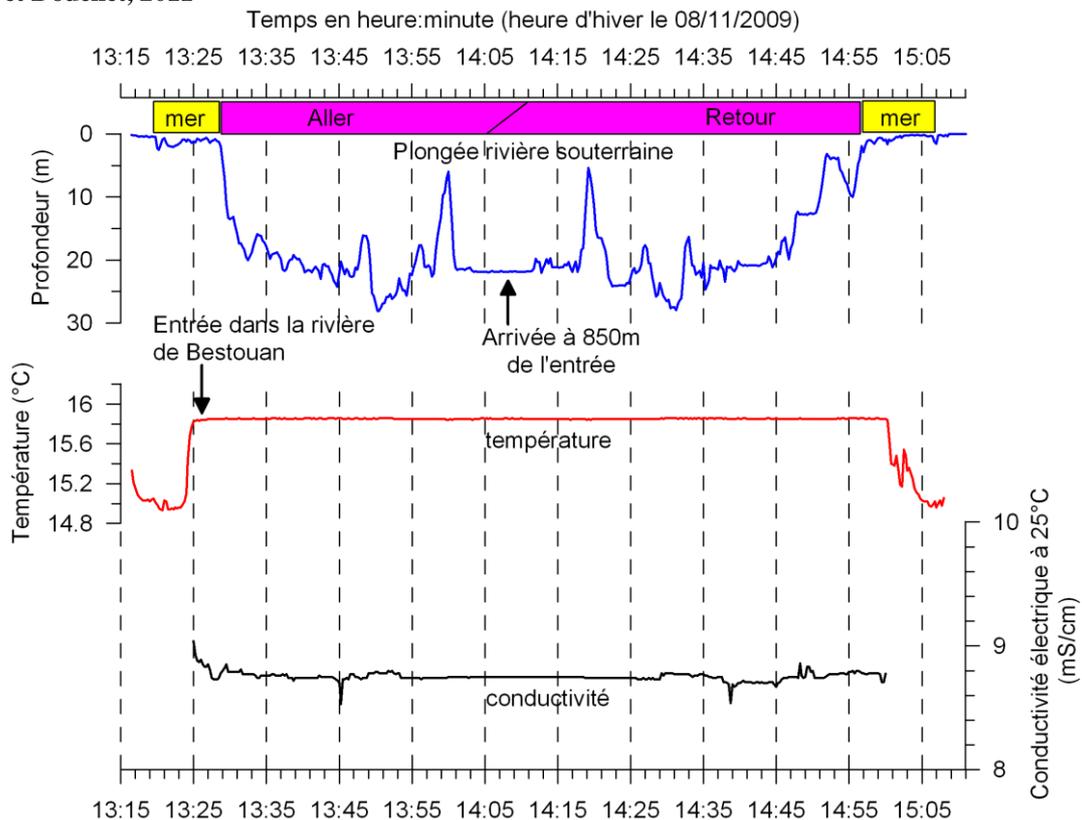
Tracé des galeries karstiques noyées de Port Miou et Bestouan explorées par les spéléo-plongeurs (topographies spéléo-plongeurs SRPM, CRPS, FFESSM, GEMISC)



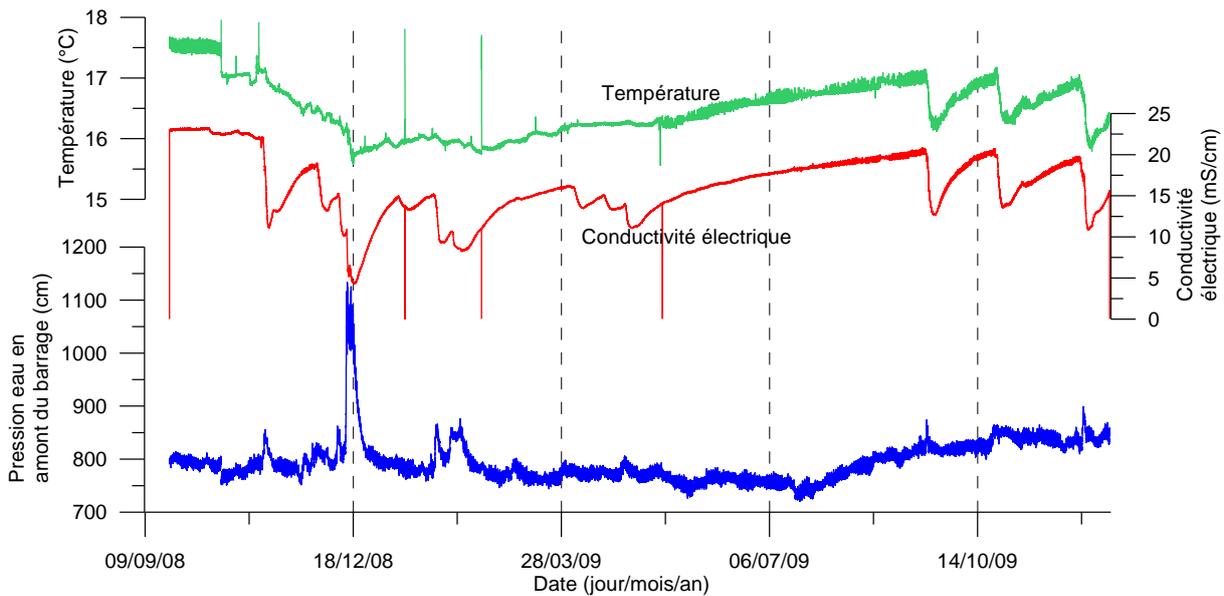
Topographie des 900 premiers mètres de la galerie karstique noyée de Port Miou, réalisée par les spéléoplongeurs à l'aide de la technologie Cobra-tac (extrait de Michel L. et al., 2012)



Enregistrement CTD (Conductivité électrique, Température, Pression) lors de l'exploration de la galerie de Bestouan jusqu'à 850 mètres de l'entrée - Extrait de Arfib et Douchet, 2011



Données CTD acquises à l'amont du barrage souterrain de Port Miou (Arfib-Gilli)

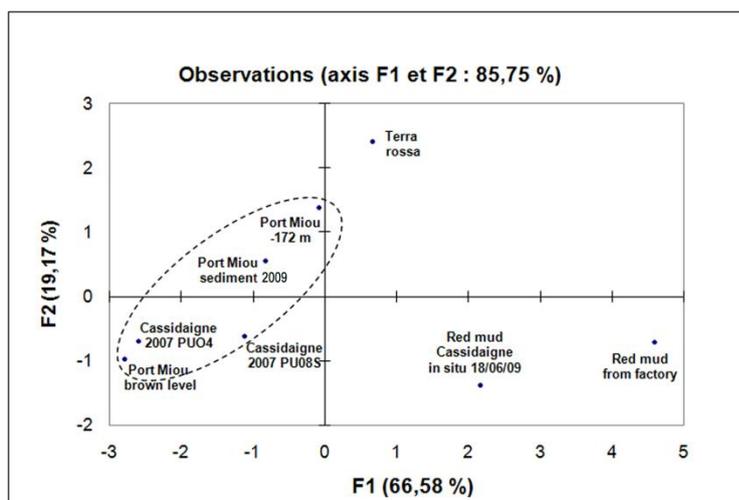


- ➔ une eau salée "chaude"
- ➔ une salinité inversement proportionnelle au débit
- ➔ une salinité minimale résiduelle
- ➔ plus importante crue enregistrée : 50 m³/s (déc. 2008, débordement du barrage)

Lieux et date de prélèvement	Cond. spéc. (mS.cm ⁻¹)	Salinité (g.l ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ [mg.l ⁻¹]	SO ₄ ²⁻ [mg.l ⁻¹]	Cl ⁻ [mg.l ⁻¹]	Br ⁻ [mg.l ⁻¹]	Ca ²⁺ [mg.l ⁻¹]	Mg ²⁺ [mg.l ⁻¹]	Na ⁺ [mg.l ⁻¹]	K ⁺ [mg.l ⁻¹]	rBr/rCl [10 ⁻³ x meq.l ⁻¹]
1820 m du barrage -172 m NGF 19/11/05	18,53	10,82	265	1063	6320	26	225	377	3660	157	1,83
290 m du barrage -18 m NGF 19/11/05	18,68	10,92	257	960	6480	25	237	397	3700	151	1,71

Tableau 4-11 : Analyses chimiques des prélèvements faits dans la galerie de Port Miou

Extrait de Cavalera 2007



Analyse factorielle en composantes principales pour les métaux lourds des sédiments et boues rouges de la région de Port Miou. On note une proximité pour les boues rouges déposées au fond de Cassidaigne et le dépôt rouge de la Galerie de Port Miou (Cavalera et al, 2010)

Traçage artificiel KarstEAU 2011 – Injection de sulforhodamine B à la perte de Mauregard – Définition du bassin d'alimentation des sources sous-marines

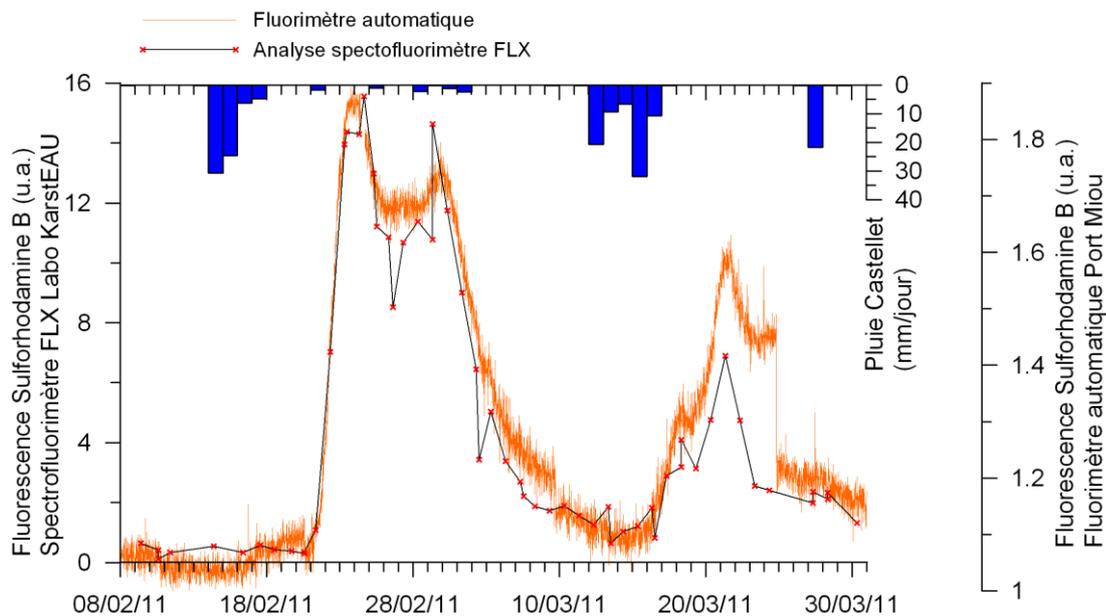
Rapport disponible en téléchargement sur www.karsteau.fr

Objectifs :

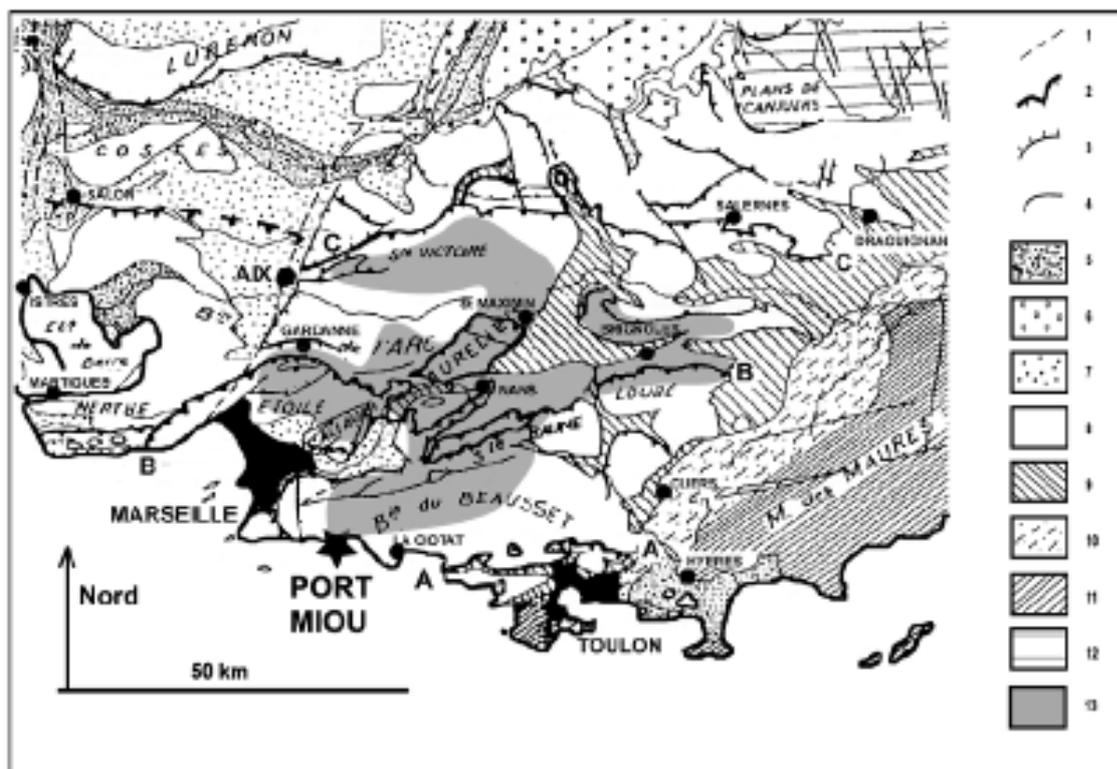
- Délimiter la limite de partage des eaux entre la baie de Cassis et de la Ciotat
- Tester le rôle des marnes gargasiennes (Aptien) sur l'écoulement souterrain
- Etudier le mode d'écoulement dans le karst (Unité du Beausset)



Restitution de sulforhodamine B à la source de Port Miou, injectée le 8 février 2011 à la perte de Mauregard (extrait de Arfib et Lamarque, 2012)



- ➔ 30 kg de sulforhodamine B injectés le 8 février 2011 dans une perte à sec
- ➔ chasse par 18 m³ d'eau des pompiers
- ➔ Pluies intenses les 14 et 15 février 2011
- ➔ Perte absorbe l'eau provenant du Grand Caunet à partir du 14 février 2011
- ➔ Arrivée du traceur à Port Miou (et Bestouan) le 21 février 2011, soit 7 jours après les pluies
- ➔ Vitesse de première arrivée du traceur (temps de transit= 7 jours, distance 12 km)
= 1,7 km/jour (71 m/heure)



Bassin hypothétique élargi proposé par E. Gilli (2001) à partir de l'observation de déficits hydrologiques pour les unités calcaires de Basse Provence, opposés à l'excédent mesuré à Port Miou.

Bibliographie

- Arfib B. (2001) Etude des circulations d'eaux souterraines en aquifères karstiques côtiers : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce). *Thèse de doctorat* de l'Université Paris 6. 343p.
- Arfib B., Douchet M. (2011) Etat des connaissances hydrogéologiques et spéléonautiques sur les rivières souterraines sous-marines de Port Miou et du Bestouan (Cassis, France). 9th Conference on Limestone Hydrogeology, 1-3 Sept. 2011, Besançon, France
- Arfib B., Lamarque T. (2012) Etude du bassin d'alimentation des sources sous-marines de Port Miou et Bestouan par traçage artificiel : les marnes de l'Aptien sont-elles imperméables? Actes des 18^{èmes} journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie. Colloque de Cassis, 15-17 mars 2012.
- Cavalera T., Arfib B., Gilli E. (2010) Les rivières souterraines de Port Miou et Bestouan : les plus longs réseaux noyés des littoraux européens. *Ouvrage collectif: Karst et grottes de France* sous la direction de P. Audra. Karstologia Mémoires 19. 360 p.
- Cavalera T., Gilli E., Mamindy-Pajany Y., & Marmier N. (2010) Mechanism of salt contamination of karstic springs related to the Messinian deep stage. The speleological model of Port Miou (France). *EGU General Assembly 2009, Vienna, spec. issue. Geodinamica Acta 23 /1-3*, 15-28.
- Cavalera Thomas (2007) Etude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port Miou (Cassis, Bouches-du-rhone). Approche multicritère. Thèse de doctorat de l'Université de Provence. 403 p.
- Gilli E. 2001, - Compilation d'anciennes mesures de débit à Port Miou. Apport à l'hydrogéologie de la Provence. 7e coll. hydrogeol. en pays calcaire et milieu fissuré. Besançon, 20-22 sept. 2001. p. 157-160
- Gilli E. (2009) Localisation des émergences karstiques des calanques de Cassis et de la baie de La Ciotat. Avec la collaboration de A. Tassy, A. Fournillon et B. Arfib. *Projet KarstEAU – Aix-Marseille Université.*
- Michel L., Douchet M., Potie L., Acquaviva G. (2012) Topographie de galeries karstiques noyées et pénétrables – l'exemple de Port Miou (Cassis). Actes des 18^{èmes} journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie. Colloque de Cassis, 15-17 mars 2012.

LES BARRAGES DE PORT-MIOU

SYNDICAT DE RECHERCHES DE PORT-MIOU (S .R .P.M)

1964 à 1981

Louis Potié et Bernard Tardieu Association Cassis Rivière Mystérieuse (GEMISC)

1 BREF HISTORIQUE...

- 1964 à 1971 : Après les premières explorations de l'OFRS, reprise des explorations par plongées et premières études par la SEM et le BRGM :
 - 1967 : Diagnostic SRPM sur l'origine de la salinité des eaux de Port-Miou et du Bestouan par le laboratoire de la SEM.
 - 1968 ... Juillet : Découverte repérage d'une poche d'air à 530 m de l'entrée, appelée "Cloche 500"
- CREATION DU SYNDICAT**

En 1964 la **Ville de Cassis**, souhaitait que les études soient entreprises sur les résurgences de Port-Miou et du Bestouan en vue de leur utilisation. La DATAR prévoyait une forte croissance démographique pour Marseille. L'alimentation en eau dans la région était assurée par la SEM. Il était nécessaire de chercher de nouvelles ressources en eau. De son côté le **BRGM**, étudiait ce type de résurgences... Les ressources en eau souterraine de Cassis représentaient un enjeu important qui justifiait les études à mener sur ces rivières, en vue de connaître leur origine, leur potentiel. Ces deux organismes et le Bureau d'Ingénieurs Conseils Coyne&Bellier créèrent le Syndicat de Recherches de Port-Miou (SRPM).

2 ETUDES ET TRAVAUX PRELIMINAIRES

ORIGINE DU SEL - ANALYSES

Le premier souci du Syndicat a été de déterminer l'origine du sel contenu dans les eaux douces de rivières avant de poursuivre les études et de se lancer dans le projet de barrage. Les analyses faites au laboratoire de la SEM ont porté préférentiellement sur l'évolution de la teneur en chlorure et sulfates permettant de déterminer l'origine marine du sel. Elles ont été faites sur des échantillons d'eau prélevés à plusieurs niveaux régulière à 110 m de l'entrée, avec une "relevage" bimensuel des enregistreurs.

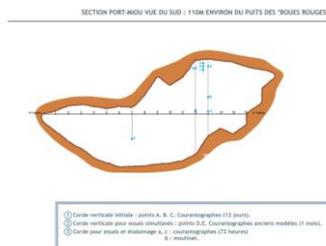
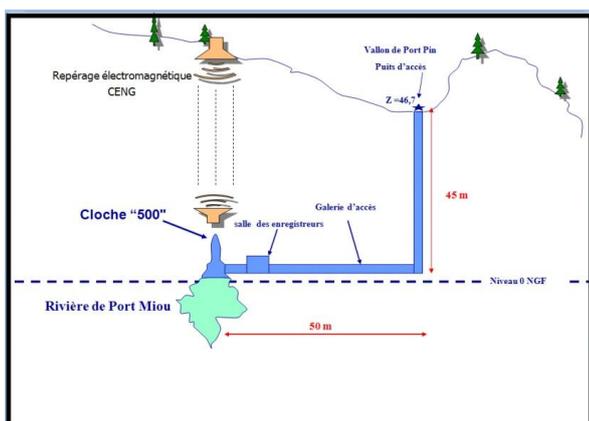


Figure 9
Section d'enregistrement à 110 m de l'entrée

ACCES A LA "CLOCHE 500" DE LA RIVIERE ...

Avant de construire un barrage capable d'arrêter l'invasion marine, il fallait accéder au site choisi pour ce barrage dans la galerie noyée : La "Cloche 500" ! -Un puits et une galerie d'accès ont été percés et les travaux du premier barrage expérimental entrepris.



Puits et Galerie d'accès depuis le vallon de Port-Pin
Salle des enregistreurs dans la galerie d'accès



3 LES BARRAGES

1971...PREMIER BARRAGE ... UNE "CHICANE"

LE CONCEPT

L'idée première a été de construire un barrage "anti-sel" comme il en existe sur des rivières ou fleuves côtiers. Pour garantir l'efficacité du barrage "anti-sel" dans la galerie de Port Miou, le concepteur (Bernard Tardieu du BIC Coyne) a proposé le principe d'un barrage dit "en chicane". La "Chicane" consiste à construire un "couple" de barrage. Un barrage dit "Amont", à l'endroit, posé sur les sédiments du fond de la galerie et un barrage dit "Aval", à l'envers accroché au plafond de la galerie contraignant l'eau douce à passer sous le seuil. La solution du barrage "en chicane", partielle, ne modifiait pas l'état de pression.

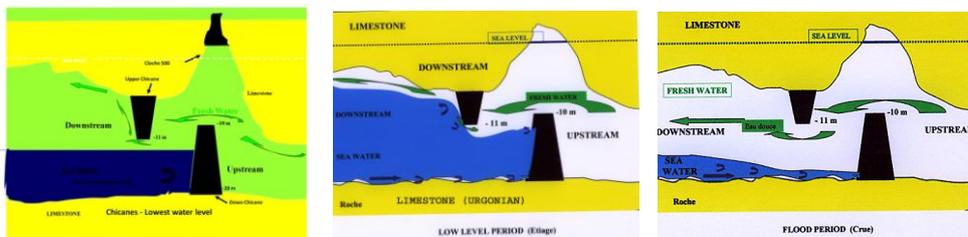


Fig 4 -5-6 :: le "concept".....l'étiage..... ..La Crue' ...

...1972... LA REALISATION



Figure 7 : Paroi aval du barrage

...Une première ...!

!... Premier barrage sous marin ...Coulis de densité à peine supérieure à celle de l'eau de mer pour ne pas charger les sédiments sur lesquels le barrage a été implanté et sondés sur plus de 9 mètres.... Des centaines d'heures de plongée...Coulage dans des conditions difficiles : courants, pertes...

Cette première phase de travaux s'est achevée le 5 décembre 1972 La "chicane" a eu un impact positif notable sur la salinité de l'eau.

...1977 ...DEUXIEME BARRAGE ... Obstruction totale de la galerie- déversoir de crue

Les concepteurs décidèrent en 1975 d'apporter une modification au projet initial prenant en compte la possibilité de circulations provenant d'un karst plus profond que laissait présager les connaissances d'alors sur l'évolution de la Méditerranée avec ses régressions accompagnant les glaciations successives.

C'est donc sur cette hypothèse d'une karstification jusqu'à la profondeur de - 120 mètres sous le niveau de la Mer que le projet a été conçu pour la côte du déversoir fixée à 3, 96 m NGF. A ce niveau la charge, variable avec l'intensité des pluies, devait permettre de contrôler le biseau salée jusqu'à 200 mètres environ sous le niveau de la Mer.

...Deux contraintes imposées:

- Limiter les pénétrations d'eau de mer qui pourrait venir d'un karst profond sous la galerie.
- Eviter des effets de crue avec un déversoir de crue et la pose de plusieurs conduites (Ø 500 et Ø 1000) dans la masse du barrage devaient permettre de contrôler la mise en charge et faciliter l'évacuation des crues.

REALISATION

...L'épisode du "renard"... : Ce chantier a été réalisé entre juillet et octobre 1976..mais à peine construit une forte crue a provoqué un fort affouillement dans les sédiments sous le barrage...un "renard"... Nous avons négligé le fait que ces sédiments pouvaient être perméables avec un coefficient de perméabilité faible certes mais non nul ! Les vitesses de circulations sont sans doute très faibles dans ces sédiments. Une forte pluie a entraîné une mise en charge brutale (+de 5 m de charge) et produit cet affouillement important ...On

a utilisé ce vide imprévu à – 20 m sous le barrage pour installer, dans des conditions particulièrement difficiles et dangereuses, un tuyau en acier de 1,5 m de diamètre composé d'éléments assemblés.

Pour limiter le phénomène de circulations dans les sédiments sous le barrage Bernard Tardieu proposa d'augmenter la distance de circulations en installant, de part et d'autres du barrage, un recouvrement étanche fait de boudruches de coulis. ...Les plongées se faisaient au "Narguilé",

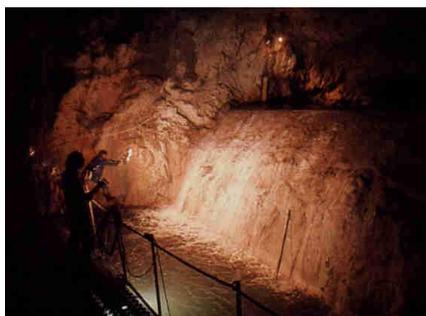


Figure 9 :Déversoir de crue et crue
Figure 10 La "Cloche 500"



Fin 1977 après colmatage de la fuite et fermeture des vannes le 13 Janvier, on enregistra un déversement continu. La hauteur de la lame d'eau déversante permet de mesurer le débit. Ce débit de "déversement" a pu être mesuré en "continu" en 1978. On peut citer quelques points : 45 m³/s en janvier, 11 m³/s en février, 2,6 m³/s en avril, 6,5 m³/s en mai. Mais ces débits ne prennent pas en compte les débits de fuites, que l'on savait non négligeables. Aujourd'hui l'Association et l'Université utilisent ces buses pour des mesures de débit, en prenant en compte les pertes que l'on sait estimer.

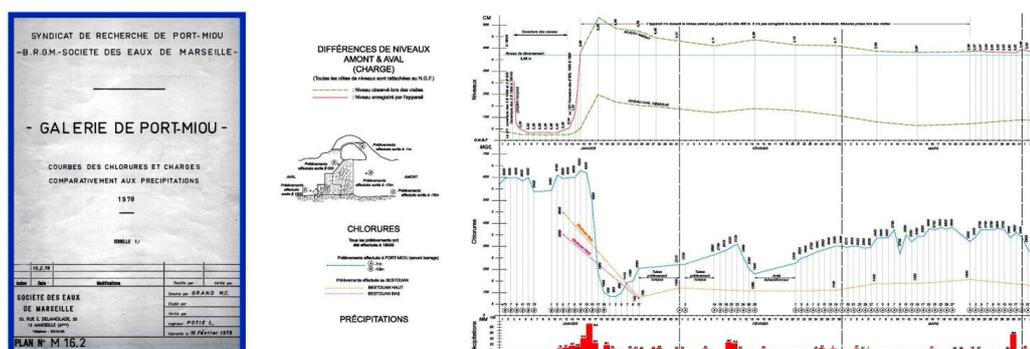


Figure 18 : Enregistrements 1977-1978 au barrage

4 CONSTATS ET DECISIONS

CONSTATS

- **Premier constat** : Dès 1968 les observations durant les périodes de fortes précipitations permettaient d'étudier les réactions du karst Elles ont permis de se faire une première idée des débits (eau douce) estimés à 3 à 4 m³/s "hors crue" et à 2,5 m³/s à l'étiage.

- **Deuxième constat** : L'augmentation progressive de la salinité consécutivement à la diminution de la charge hydraulique tendait à confirmer la sérieuse probabilité de circulations karstiques profondes bien en dessous du niveau marin le plus bas –120 m, connu et admis alors avec la dernière grande glaciation (18 à 20.KA A.C). Cette probabilité reposait sur l'hypothèse d'un assèchement quasi-total de la Méditerranée de la fin du Miocène au début du Pliocène (Messinien). Hypothèse confirmée depuis avec la découverte d'épais dépôts d'évaporites durant la période d'assèchement (paroxysme au Messinien) . Cette hypothèse d'un karst profond a été confirmée par les plongées qui ont atteint 178 m sous le niveau marin.

- **Troisième constat** : Les prévisions de croissance démographique sérieusement revues à la baisse, les besoins en eau ne justifiaient plus la poursuite de l'expérimentation. L'utilisation de ces eaux pour la consommation humaine aurait nécessité un traitement de désalinisation économiquement injustifiable pour la région

DECISION : 1979

Arrêt de cette extraordinaire... un peu présomptueuse... et folle aventure Devant l'insuccès de cette dernière expérimentation la sage décision d'interrompre les études sur Cassis a été normalement prise...et les acteurs ...avec un peu de nostalgie il est vrai ! ... ont retrouvé d'autres activités plus monotones et moins aventureuses...et ils le confessent aujourd'hui ...sans consacrer le temps et l'énergie qu'il aurait fallu pour rendre compte de cette phénoménale aventure...Raconte-t-on ses rêves ! Ils le font aujourd'hui ... avec bien du retard, pour combler cette lacune des publications actuelles!...Un seul exemplaire d'une partie de la documentation avait été conservé par l'un de nous ! Par chance...Archivages à la casse ou perdu dans quelques recoins poussiéreux ?

Les vallées de la Giscle et de la Môle : un exemple de gestion intégrée des ressources en eau côtières

Par Philippe Bouilly, Thomas Cavalera, Jean-François Cottin et Marc Moulin



LA FAMILLE OBOULOT EN VACANCES



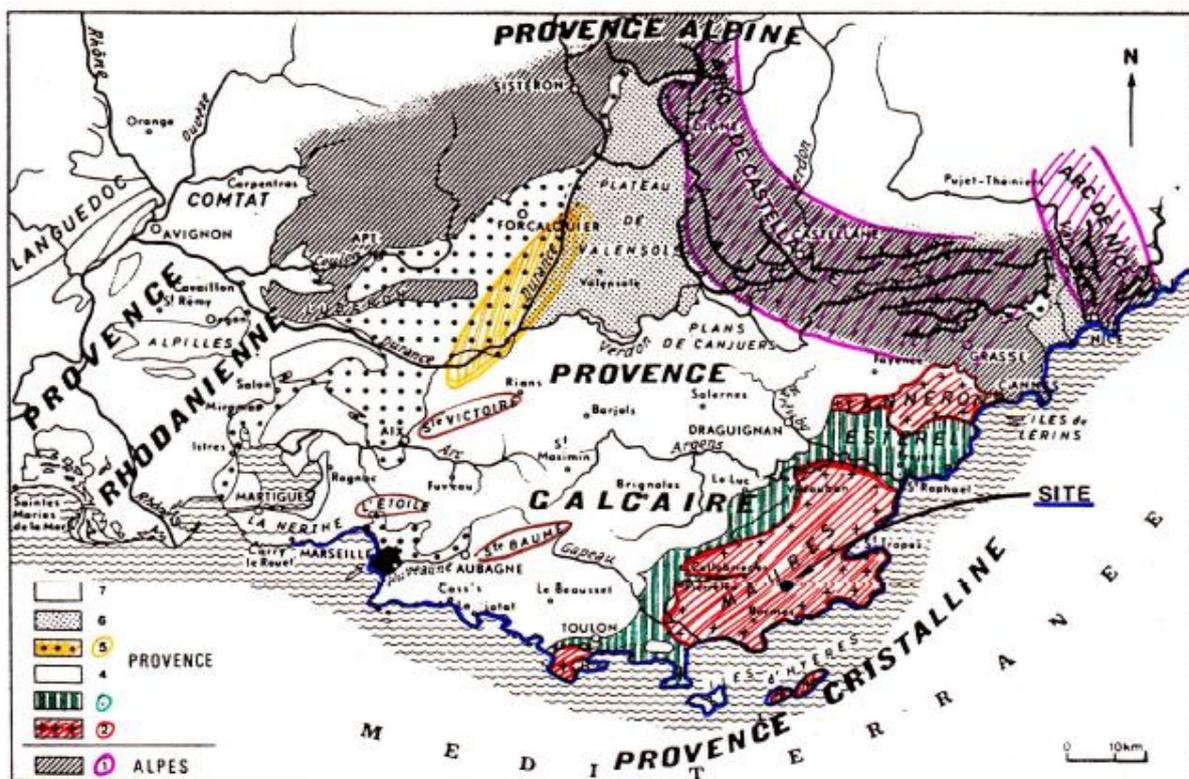
SOMMAIRE :

1/ Introduction générale : de la géologie au patrimoine... ..	25
Le contexte géologique régional et le massif des Maures :	25
Morphologie du bassin versant de la Giscle.....	26
La biodiversité - quelques exemples d'espèces rencontrées dans le secteur	27
Le patrimoine culturel et architectural	29
2/ le barrage de la Verne : une des ressources en eaux de surface.....	32
3 / les ressources en eau souterraine	38
4/ la gestion intégrée des ressources en eau dans le BV de la Giscle	43
5/ Perspective : quelle eau pour les 30 prochaines années ?	49
Quelques références bibliographiques utilisées dans ce guide :	51

1/ Introduction générale : de la géologie au patrimoine...

Le contexte géologique régional et le massif des Maures :

De par son histoire géologique riche et mouvementée, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur possède une grande diversité de terrains, qui ont imprimé aux paysages la grandeur et la beauté qu'on leur connaît. Le corollaire à cet état de fait est une complexité géologique du sous-sol, et singulièrement une grande compartimentation des terrains aquifères. Les grands réservoirs naturels que constituent les bassins sédimentaires français à l'image des bassins parisien ou aquitain sont donc absents de la région. Il sera difficile de trouver des secteurs dans lesquels les structures géologiques visibles depuis la surface pourront être suivies sur de grandes profondeurs.



① : Domaine alpin. 2 à 6 : Domaine provençal. ② Socle primaire. ③ Permien sédimentaire. - 4. Couverture sédimentaire du cycle provençal. du Trias à l'Éocène. - 5. Principaux bassins oligocènes et miocènes. - 6. Principales nappes alluviales pliocènes. - 7. Principaux affleurements quaternaires.

Figure 1 : Esquisse géologique régionale (JF Cottin d'après Debelmas).

Le massif des Maures occupe la partie sud-est du département du Var, et s'étend depuis la ville d'Hyères jusqu'à celle de Fréjus. Sa structure est orientée NE-SW, bordée au nord par la dépression permienne et au sud par la mer méditerranée. Les îles d'Hyères se situent entre 10 et 20 km au sud et au sud-est de la ville d'Hyères : sud de la presqu'île de Giens, Porquerolles, Port-Cros, et l'île du Levant.

L'altitude du massif est généralement comprise entre 200 et 600 m, avec un point culminant à 780 m (la Sauvette). Sur les îles, l'altitude peut atteindre 150 à 200 m (Port-Cros).

Le massif est parcouru par un réseau hydrographique très serré et torrentiel. L'orientation des cours d'eau est commandée par deux directions principales : l'une EW (Giscle, Môle, Préconil), et l'autre NS (Maravenne et cours d'eau côtiers). Il s'agit de cours d'eau méditerranéens, caractérisés par un étiage estival très sévère. Les hautes eaux correspondent à l'automne et à l'hiver. La pluviométrie moyenne est de 964 mm/an à Collobrières, et de 671 mm/an à Porquerolles.

Les Maures correspondent à un bombement général du socle hercynien d'orientation NE-SW. La presque totalité du massif est constituée par des formations cristallo-phylliennes (schistes, gneiss), auxquels sont associés des roches plutoniques (granite, dolérite...) et volcaniques (rhyolites).

Les formations cristallo-phylliennes sont d'origine sédimentaire (pélites argileuses, flyschs grés-argileux, marno-calcaires) et le métamorphisme général qui l'a affecté s'accroît d'ouest en est. Elles ont généralement une orientation N.NE/S.SW (stratification, plans de schistosité et de foliation), et un pendage vers le nord-ouest, de l'ordre de 50 à 60°. L'accident de Grimaud, témoin de la tectonique hercynienne cassante, recoupe le massif du nord au sud, et se trouve décalé par les failles de Collobrières et de la Môle, de direction EW est postérieure, et qui datent de la période Stéphanien-Permien.

Les massifs intrusifs granitiques (batholites), qui se sont mis en place à la fin de l'évolution métamorphique majeure de la région, recoupent les assises cristallo-phylliennes dans les secteurs de Plan-de-la-Tour et Cogolin.

On peut distinguer 3 secteurs géologiques principaux :

- *Partie ouest du massif* (Pierrefeu, La Londe) : phyllades (schistes), quartzites, passées gréseuses et micro-conglomératiques ;
- *Partie centrale* (Lavandou, la Garde-Freinet) : formations détritiques (pélites, micaschistes, grauwackes), formations volcaniques et volcano-sédimentaires (amphibolites), et gneiss quartzo-feldspathiques (gneiss de Bormes) présentant des faciès de méta-granites et de méta-arkoses ;
- *Partie Est* (St Tropez, Plan-de-la-Tour) : Gneiss migmatitiques, et granites, notamment les granites de Plan-de-la-Tour.

Les formations du massif des Maures s'orientent vers le Nord et l'Ouest sous les grès et pélites permiennes correspondant dans la topographie à une zone déprimée ceinturant le massif et suivie par la vallée de l'Argens au Nord, et celle du Réal martin puis de l'Eygoutier à l'Ouest.

Morphologie du bassin versant de la Giscle

La Giscle est un « fleuve côtier », qui prend sa source au pied du Sommet des Trois-Confronts, dans la forêt des Maures (à l'altitude 290 m environ) pour se jeter en Méditerranée à Port-Grimaud 22 km plus loin (Figure 2). Elle reçoit les eaux de la Môle, son principal affluent rive droite en aval immédiat de Cogolin. La Môle qui elle-même récupère les eaux de la Verne (et de son barrage). La Giscle possède également comme affluent rive gauche la Garde qui conflue environ 2 km avant l'embouchure.

Les alluvions de la Giscle sont uniquement développées au débouché de la plaine alluviale, tandis que celles de la Môle se prolongent vers l'ouest dans une vallée de plus en plus rétrécie (en bleu ciel sur la carte de la Figure 2).

Le relief est peu marqué au sein des vallées : l'altitude est d'environ 55 m NGF à l'amont dans la vallée de la Môle, et diminue progressivement vers l'aval (24 m à la Môle, 5 m en moyenne dans la plaine alluviale près du littoral). Les sommets entourant les plaines alluviales peuvent dépasser les 600 m d'altitude (La Chartreuse de la Verne est à l'altitude 640 m, comme le sommet du Bœuf ou la montagne du Faucon).

Les sols sont principalement voués à l'agriculture (vignes et prairies). Leur surface tend néanmoins à régresser au profit de l'urbanisation, notamment dans le secteur aval.

Le climat est de type méditerranéen. D'après les données Météo France, la pluviométrie est de 943 mm/an à Saint-Maur (20 m d'altitude).



Figure 2 : Les vallées de la Giscle et de la Môle (© IGN BD CARTO).

La biodiversité - quelques exemples d'espèces rencontrées dans le secteur

L'occupation des sols est dominée par des espaces naturels. La végétation des massifs est constituée principalement par des chênes liège et des châtaigniers. Les zones urbanisées se trouvent en bordure des massifs, le long du littoral (Le Lavandou, Saint-Tropez, Sainte-Maxime...).

A noter la présence en amont du lac du barrage d'une variété d'Aulne (l'Aulne glutineux) dont une des dénominations (Vernium ou Verne) pourrait être à l'origine de la toponymie du cours d'eau (Figure 3).



Figure 3 : L'aulne glutineux, abondant dans la ripisylve de la Verne en amont du barrage.

Par ailleurs, en amont de la retenue de la Verne, le cours d'eau est à l'état naturel, et est inclus dans la Zone Spéciale de Conservation du Massif des Maures, intégrant le réseau Natura 2000 (Figure 4).

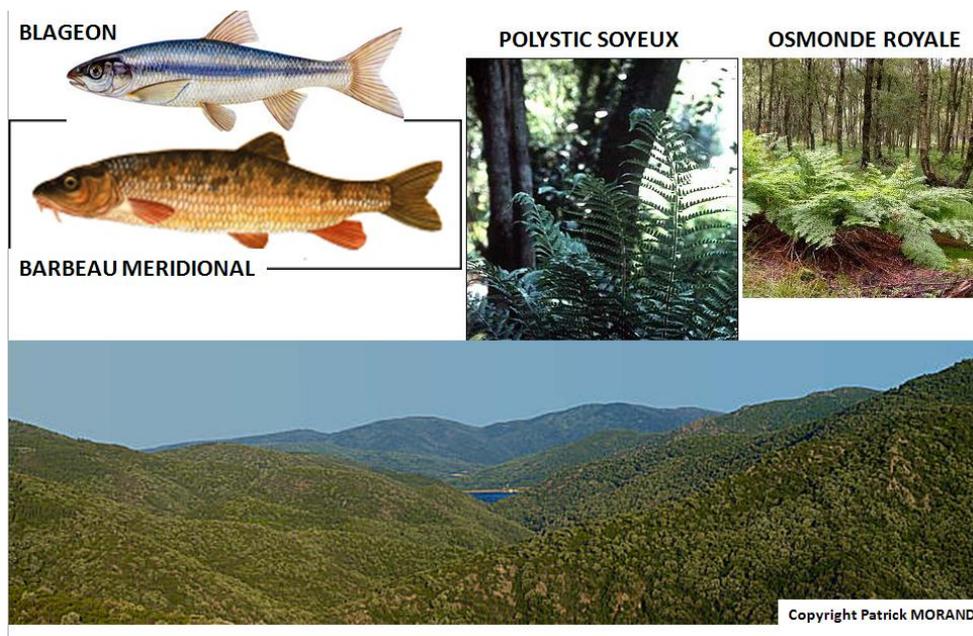


Figure 4 : Quelques espèces présentes dans et autour de la retenue de la Verne.

Plusieurs espèces, présentes uniquement dans le Var comme la Tortue d'Hermann ou une espèce de plécoptère (*Rhabdiopteryx Thienemanni*), fréquentent le lac ou ses abords (Figure 5, montrant entre autres les stades de développement d'un plécoptère).

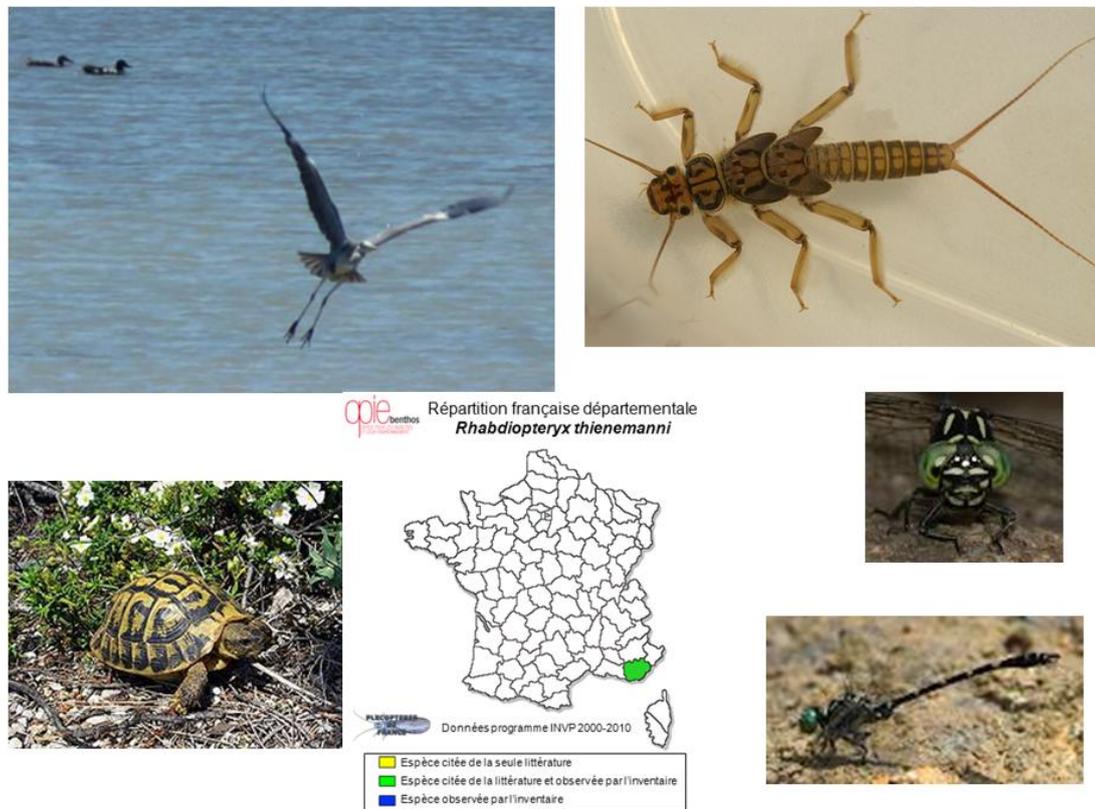


Figure 5 : Insectes et reptiles présents dans le massif des Maures, et héron cendré fréquentant le lac.

Le patrimoine culturel et architectural

Le principal édifice architectural remarquable est situé au cœur du massif des Maures, près de Collobrières, au NO de la retenue de la Verne : il s'agit de la Chartreuse de la Verne (Figure 8).

La construction remonte au XII^{ème} siècle (fondée vers 1170 par des Chartreux). Elle a subi jusqu'à la Révolution Française de nombreuses déprédations (incendies, pillages) et était quasiment abandonnée jusqu'en 1968, date à laquelle une association a initié sa « renaissance ». La réfection des bâtiments se poursuit de nos jours.

Sur le plan architectural, l'église d'origine est romane, les roches ayant servi à sa construction sont pour l'essentiel des micaschistes (moellons pour les murs et le remplissage des voûtes) et de la serpentine (amphibolite altérée, Figure 6) pour les pierres de tailles : portes, entourage des fenêtres, piliers et arcades du cloître, nervure des voutes. Les pierres de taille des entourages de baies sont en grès jaunâtre, pouvant provenir de Pierrefeu.



Figure 6 : Serpentine prélevée dans la Chartreuse, réutilisée pour le contour d'une porte dans le vieux village de Cogolin.

Les micaschistes sont présents sur l'ensemble du massif des Maures ; la serpentine n'affleure que dans un petit pointement situé à proximité (quelques km) de la Chartreuse, qui a traversé les micaschistes et qui fut exploité dans la carrière de la Môle (Figure 7). Il n'en reste aujourd'hui que quelques traces discrètes. Dans le cadre de la restauration de la Chartreuse, cette carrière a été réexploitée dans les années 1980.

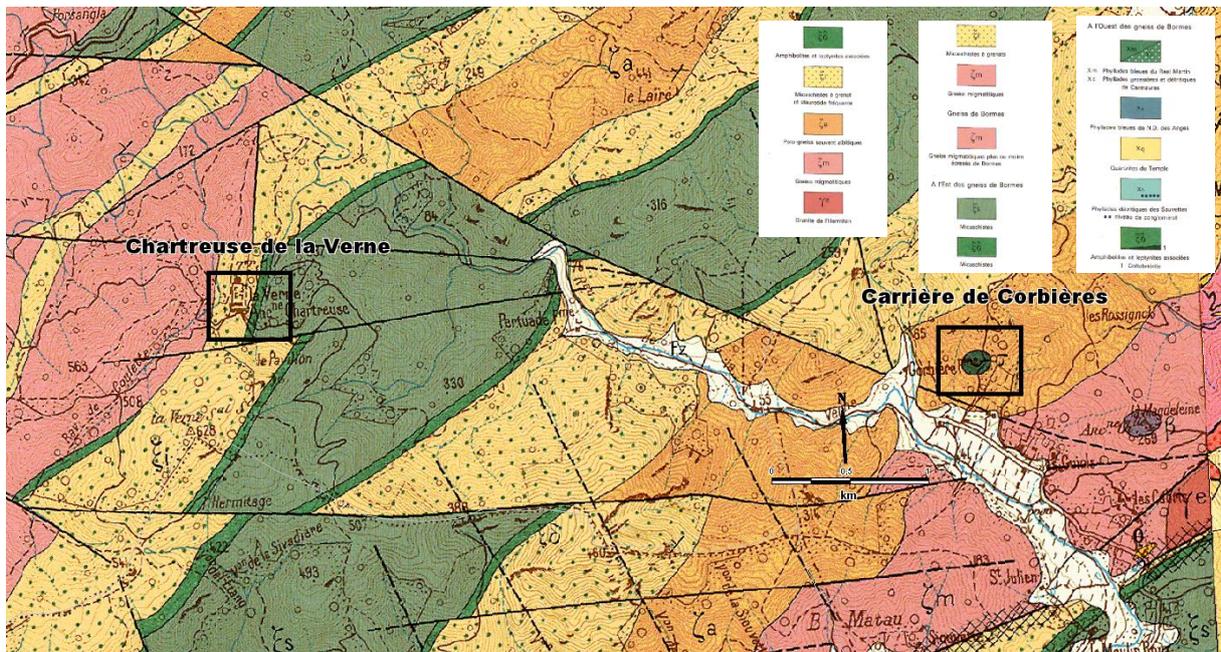


Figure 7 : Localisation de la Chartreuse de la Verne et de la carrière de Corbières (commune de la Môle) d'où furent extraits les blocs de serpentine. Carte géologique 1/50 000 1046 – Collobrières.

CHARTREUSE Notre Dame de Clémence de la Vierge 1170 (préceptes de St Bruno)



Figure 8 : La Chartreuse de la Verne, surplombant la retenue éponyme.

2/ le barrage de la Verne : une des ressources en eaux de surface.



Historique et présentation du barrage de la Verne

Pourquoi avoir construit un barrage réservoir ?

Par souci de diversification de ses ressources, de sécurité, de gestion et de maîtrise de son développement économique, le Syndicat Intercommunal de Distribution des Eaux de la Corniche des Maures a décidé dans les années 80 la construction d'un ouvrage lui assurant une distribution satisfaisante pour une trentaine d'année : le barrage de la Verne, et en a confié la Maîtrise d'œuvre à EDF. L'ouvrage a été construit en 20 mois (au lieu de 22) et a coûté 125 MF (au lieu des 140 prévus). La rivière de la Verne longue de 10 km, prend sa source à Lambert à 464 m d'altitude. Afin de préserver la faune et la flore dans le lit de la rivière, un débit minimal de 60 l/s est maintenu en permanence à l'aval du barrage, y compris pendant la période estivale (soutien d'étiage). La retenue joue également un rôle secondaire dans l'écrêtement des crues.

Par souci de respect du site, il a été particulièrement tenu compte de l'intégration architecturale des ouvrages, et notamment des bâtiments en superstructure. Des matériaux rustiques, des aménagements paysagers ont ainsi été mis en œuvre.

La géologie du site

La digue de la Verne est implantée au cœur d'un massif cristallophyllien appartenant au socle primaire de la région Provence (Figure 9). Les roches de la vallée de la Verne sont d'origine métamorphique (gneiss et micaschistes principalement, avec quelques intercalations de leptynites et amphibolites) et ont subi les phases cassantes de la tectonique hercynienne et alpine. Au niveau du site, la roche est homogène (micaschistes dominants) et ses principales caractéristiques sont la schistosité et l'altération superficielle relativement récente, dont l'épaisseur varie de 2 à environ 10 mètres. La fondation et l'étanchéité de la digue, ainsi que la stabilité des versants et l'étanchéité en grand de la cuvette de retenue, n'ont pas posé de problème géologique ou hydrogéologique particulier. Une petite faille découverte en rive droite a été soigneusement curée, confortée et injectée (« syndrome de Malpasset »).

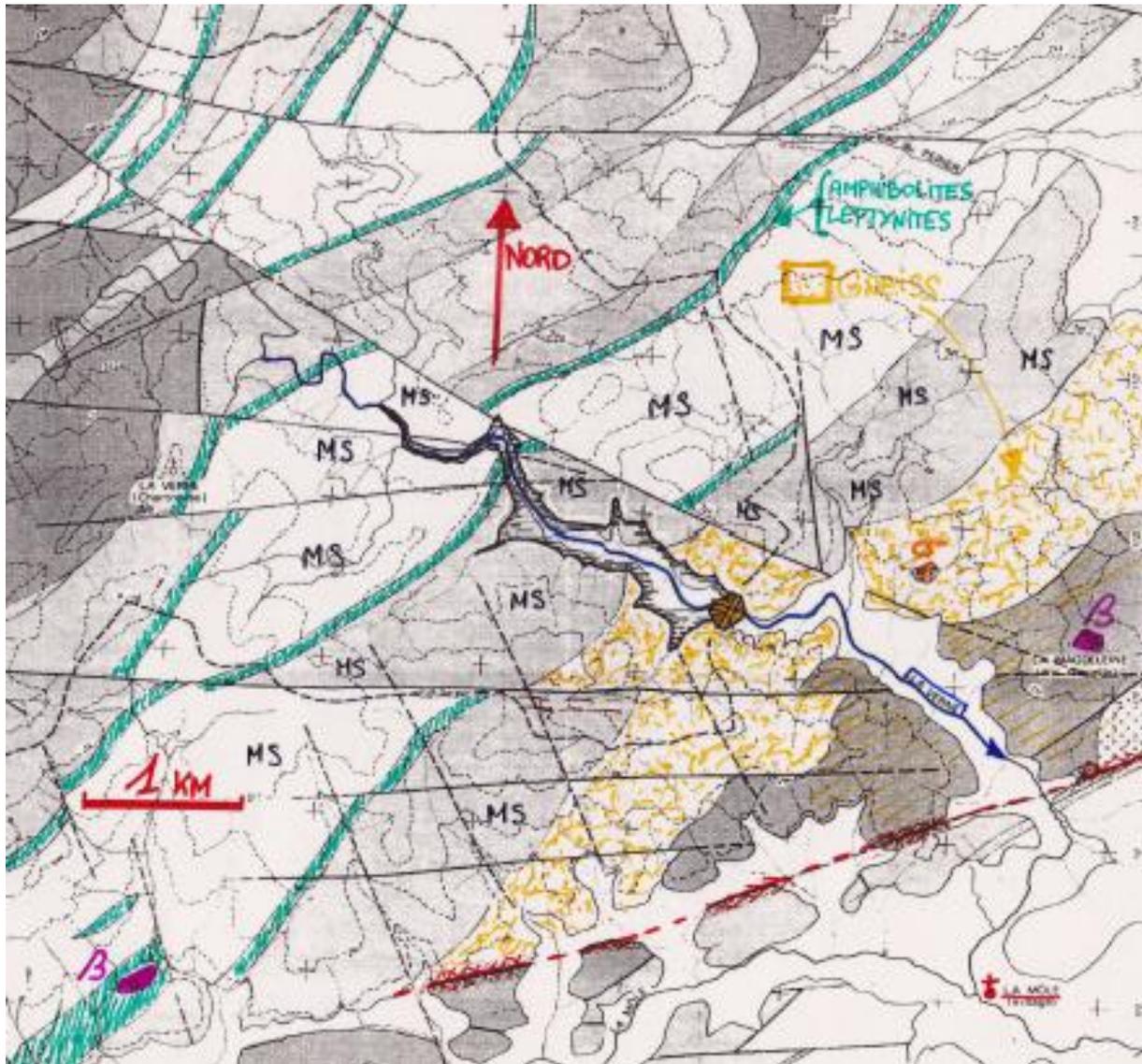


Figure 9 : le cadre géologique local (schéma JF Cottin sur fond carte géologique 1/50 000 1046 Collobrières).

L'évaluation de l'aléa sismique a été faite selon les recommandations de la Commission Internationale des Grands Barrages, selon une approche déterministe basée sur la sismicité historique de la France (fichier SIRENE). Deux séismes « de référence » ont été retenus, le séisme Ligure de 1887, intensité X MSK, à une distance de 105 km, et le séisme de 1899, intensité V MSK au droit du site. Le dimensionnement des ouvrages prend en compte la possibilité d'occurrence de l'un ou l'autre de ces séismes.

Une rapide description technique

La digue :

Le barrage-réservoir de la Verne est une digue en terre de 42 mètres de hauteur et 235 mètres de longueur en crête, constituée principalement par des matériaux (micaschistes très altérés) prélevés sur le site à l'amont du barrage, dans l'emprise de la future retenue. Le volume total de la digue est de l'ordre de 520 000 m³. La retenue créée développe une **superficie de 42 ha** et un volume de **8 millions de m³**. L'étanchéité est assurée par un **noyau central en matériaux argileux** prélevés

également sur site, prolongé dans les terrains d'assise par un **voile d'injection** de 25 mètres de profondeur au droit du noyau ainsi que d'un traitement de peau de 5 mètres de profondeur dans toute l'emprise du noyau (Figure 10). Seuls les matériaux des drains et les enrochements de protection de la digue (leptynites, gneiss et amphibolites saines) ont été importés d'une carrière voisine. Le dispositif de drainage des matériaux de fondation à l'aval du voile d'injection se fait à l'aide de sondages dans la partie basse de la vallée et de deux galeries de drainage (une par rive). L'ensemble de ces dispositions a été présenté en 1988 au Comité Technique Permanent des Barrages (CTPB) qui a donné un avis favorable à ce projet.

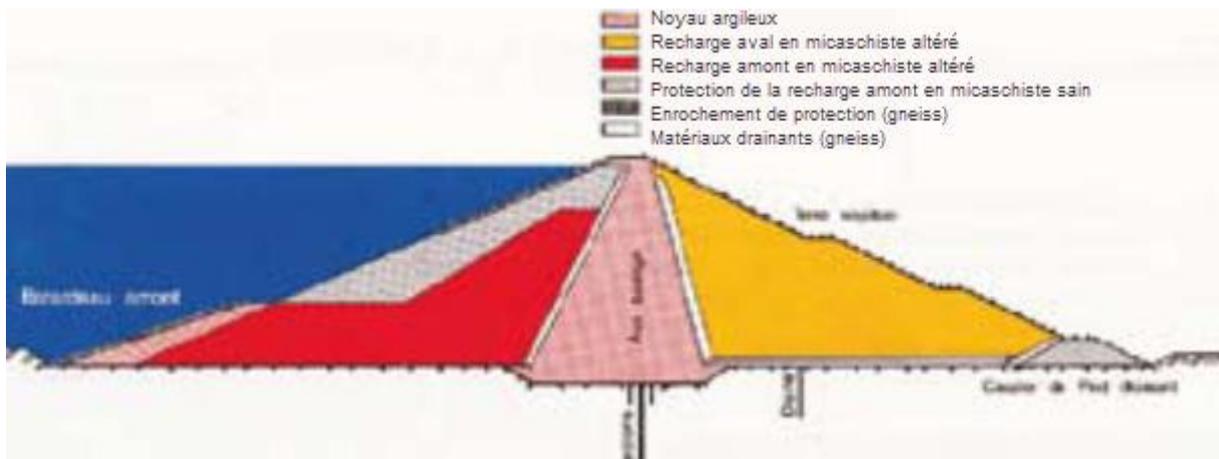


Figure 10 : Coupe technique du barrage

Une coupe suivant l'axe de la digue permet de visualiser la nature des matériaux d'assise (Figure 11).

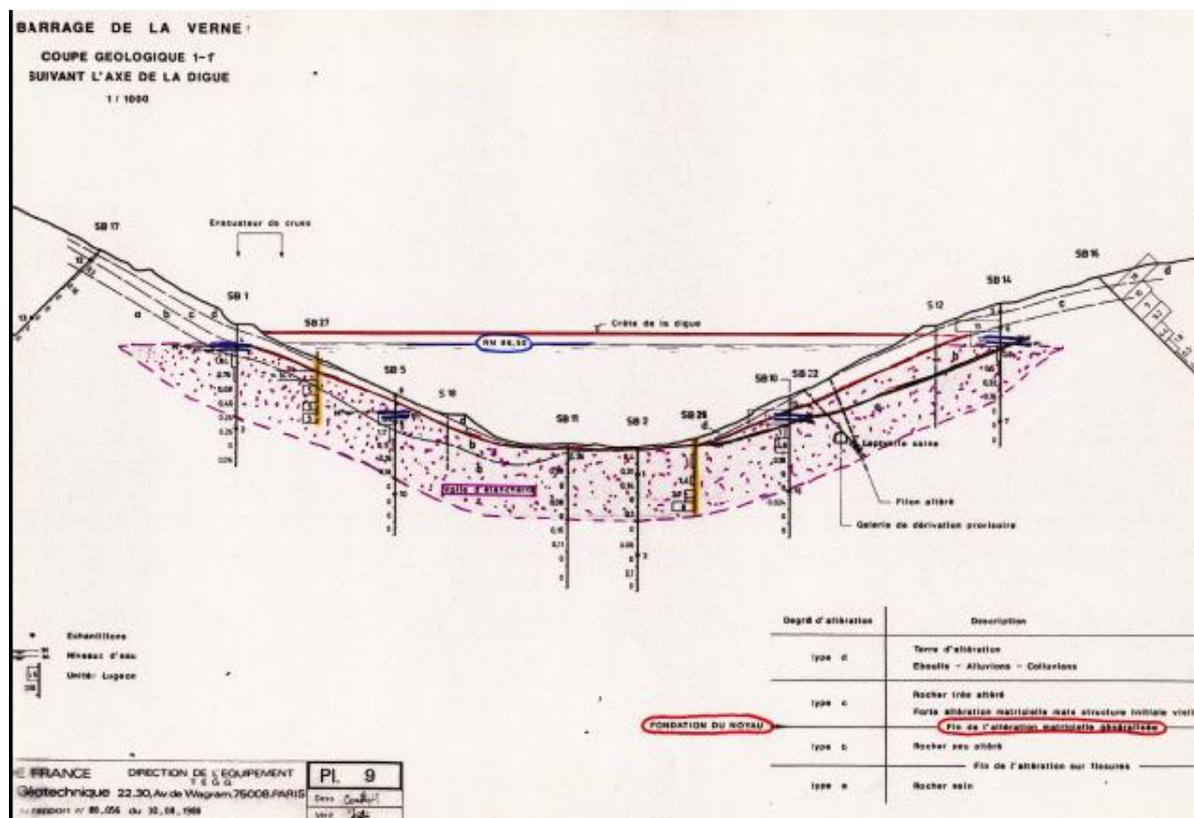


Figure 11 : Coupe le long de la digue du barrage.

La prise d'eau :

La prise d'eau est un ouvrage en béton armé de type tour. Elle comprend quatre pertuis de prise de 1,5 m² échelonnés tous les 7 m (Figure 12).

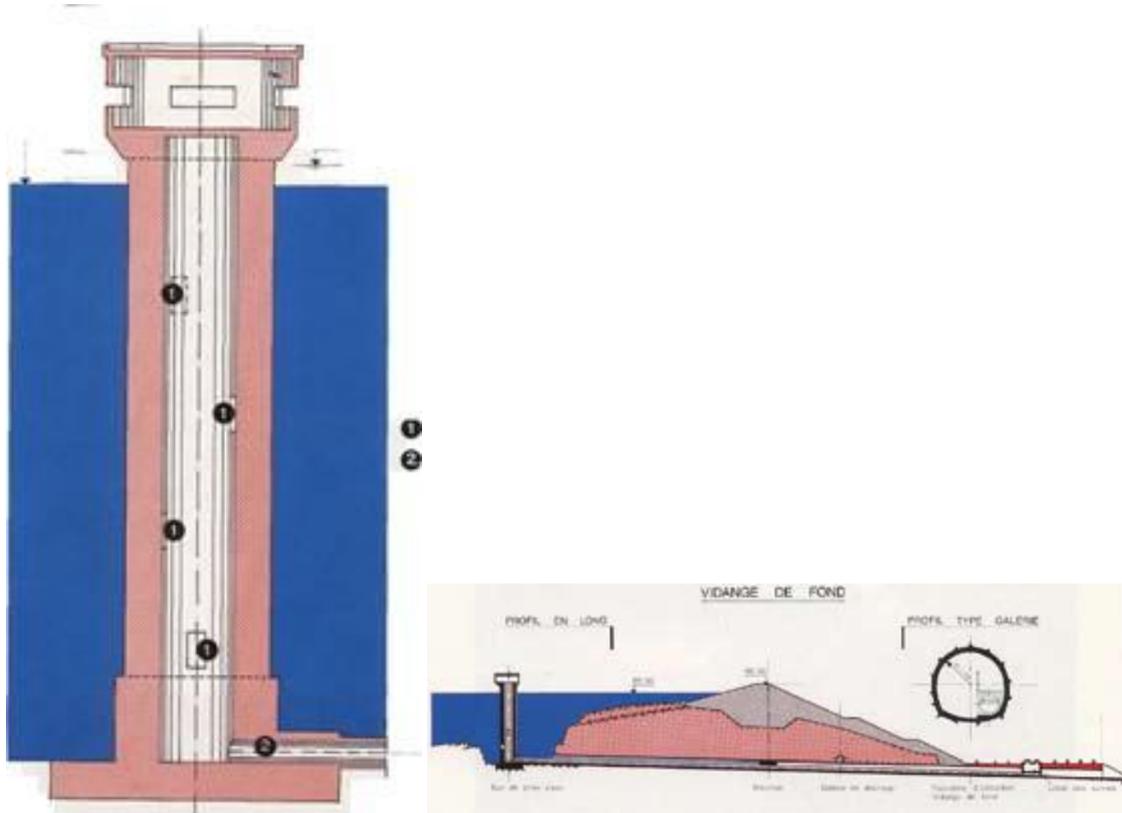


Figure 12 : Tour de prise d'eau et schéma de la vidange de fond

Chacun d'eux est protégé par une grille d'entrée fixe et équipé d'une vanne plate. La plateforme supérieure de la tour reçoit les divers engins de manœuvre nécessaires à l'exploitation de la réserve et à l'entretien des vannes. Une passerelle de 60 m de longueur relie la tour à la route d'accès à la crête du barrage.

L'évacuateur de crues :

Comme tous les cours d'eau de régime méditerranéen, la Verne est soumise à des crues violentes et soudaines qui ne doivent pas compromettre la pérennité du barrage. Afin d'éviter les risques de submersion, l'évacuateur de crues, situé en rive gauche, est largement dimensionné. Le débit de crue a été pris égal à 400 m³/s, ce qui correspond à une période de retour de 10 000 ans. A titre de comparaison, le débit moyen de la Verne est de 0,6 m³/s, le débit moyen journalier de la plus forte crue enregistrée est de 35 m³/s et le débit instantané maximum enregistré est de 99 m³/s. Au cours des vingt années d'existence du barrage, le plus fort débit passé par l'évacuateur de crue a été de 40 m³/s à l'occasion de la crue du 17 mars 2011.

Les calculs théoriques de dimensionnement ont été validés par un test sur maquette à grande échelle.

La Figure 13 illustre ce que furent les travaux de terrassement du barrage.



Figure 13 : Travaux de terrassement du barrage.

La protection du site

Sur le site du barrage de la Verne, plusieurs mesures de protection ont été prises afin de ne pas dégrader la qualité de l'eau de la retenue.

La circulation des véhicules motorisés est interdite (sauf personnel travaillant sur le site) ; la pêche, la baignade et la navigation sont interdites sur le plan d'eau. Des périmètres de protection ont été instaurés, à l'intérieur desquels toute construction est prohibée, et où toute utilisation du sol est sévèrement réglementée.

Auscultation et sécurité

Deux agents du syndicat assurent la surveillance visuelle quotidienne de l'ouvrage et du site et réalisent les mesures d'auscultation.

Les mesures d'auscultation effectuées sur l'ouvrage sont les suivantes :

Type de mesures	Dispositif	Fréquence
Cellules de pression	31 de type électrique	Hebdomadaire
Piézomètres	21 forages	Hebdomadaire
Fuites	9 points de mesure	Hebdomadaire
Topographie	19 repères	2 fois par an
Inclinomètres	2 tubes	2 fois par an

Depuis 2009 la Société du Canal de Provence est chargée par le SIDECM d'une mission d'auscultation et de surveillance du barrage, qui comporte d'une part l'analyse hebdomadaire des mesures d'auscultation réalisées par le SIDECM et d'autre part une visite annuelle détaillée de l'ouvrage.

La revue de sûreté, réalisée en 2008, a conclu que la conception, l'état et le comportement, et qu'en conséquence, le niveau de sûreté de l'ouvrage, étaient satisfaisants.

3 / les ressources en eau souterraine

Les alluvions récentes de la Giscle et de la Môle prennent place au sein du massif des Maures, essentiellement constitué de gneiss et de micaschistes. Le massif des Maures est une vaste structure plissée et affectée par de nombreuses failles de direction générale est-ouest. La morphologie de la baie de Saint-Tropez est commandée par ces grands accidents, dont certains convergent vers le golfe de Saint-Tropez. Sur leur trajet, on note un surcreusement du substratum jusqu'à des profondeurs voisines de 100 m. Ce substratum peut être localement constitué par des marnes pliocènes, intercalées entre les formations des Maures et les alluvions.

Le remplissage alluvial, qui débuta au Flandrien, est d'origine fluvio-marine et fluviale. Les alluvions sont constituées de sable argileux et d'argiles comportant des bancs sableux et graveleux. Dans la plaine alluviale, ces alluvions sont souvent recouvertes par une épaisse couverture de limons (4 à 5 m).

L'épaisseur des alluvions peut atteindre 40 m dans la plaine alluviale.

Au sein des alluvions de la Giscle et de la Môle, quelques chenaux erratiques remplis exclusivement de galets constituent les niveaux aquifères les plus intéressants. L'extension et l'épaisseur de ces niveaux très perméables sont généralement limitées.

Les formations alluviales de la Giscle et de la Môle sont de nature variée. Deux aquifères peuvent être distinguées au sein des passées perméables de ces alluvions (sables, graviers). Ces aquifères sont compartimentés par les intercalations de niveaux peu perméables (argiles, limons) :

- ✚ un aquifère supérieur, continu d'amont en aval. En partie littorale, les formations alluviales sont progressivement remplacées par des sables d'origine marine.
- ✚ un aquifère inférieur, constitué par des sables et graviers fluviaux en amont, et se fermant à l'aval par des argiles fluvio-marines. Il n'existe pas de continuité entre la zone amont et la zone littorale aval.

Les nappes présentes dans ces formations sont relativement indépendantes. Les eaux souterraines s'écoulent globalement du sud-ouest vers le nord-est en suivant la direction d'écoulement de la Giscle et de la Môle (Figure 14). Le niveau piézométrique est proche de la surface ; des mesures effectuées régulièrement montrent que celui-ci est compris entre 0,3 et 5,5 m NGF. Les fluctuations du niveau piézométrique varient entre 0,5 et 1 m, avec des baisses parfois importantes, fonction des conditions climatiques (par exemple environ 50 cm globalement d'une année sur l'autre en période d'été comme ce fut le cas entre 2010 et 2011, voir Figure 15).

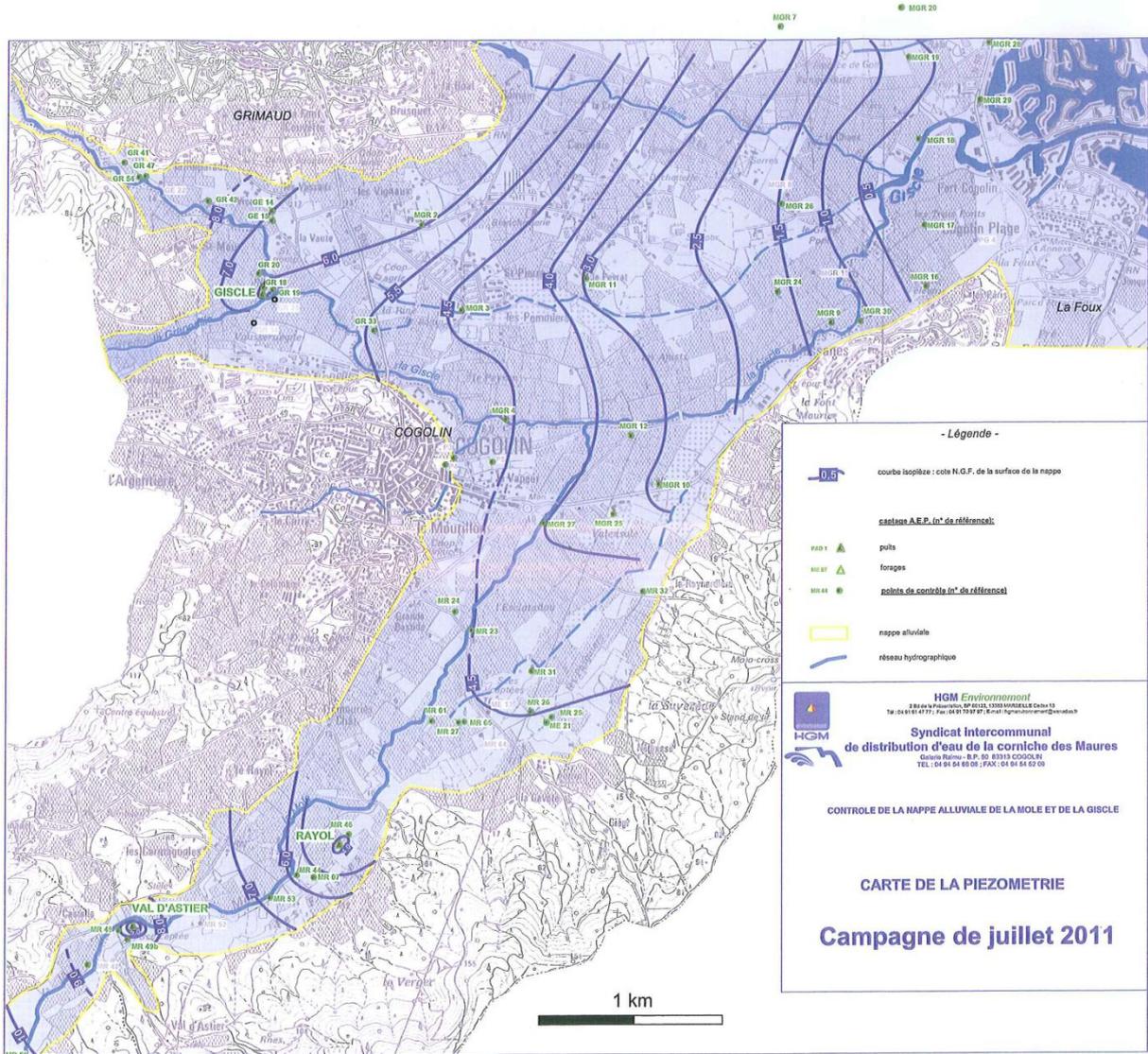


Figure 14 : Piézométrie estivale de la nappe alluviale supérieure de la Giscle – Môle (HGM Environnement, 2011).

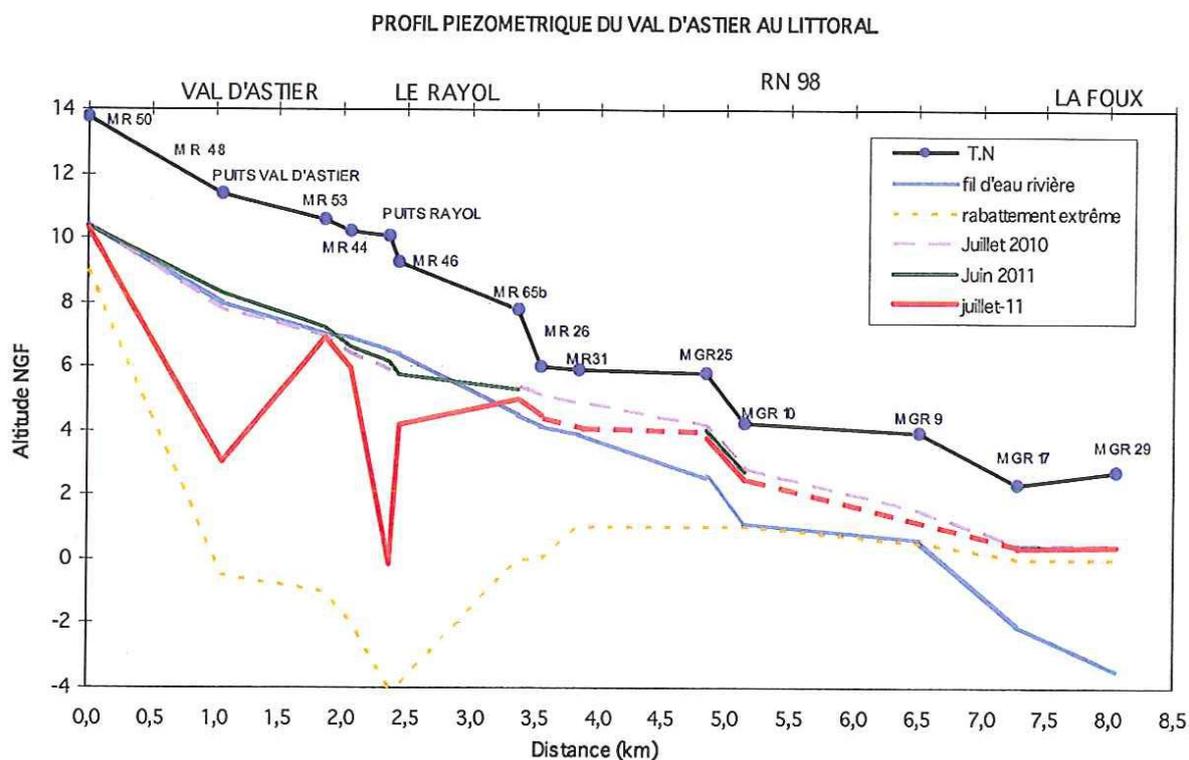


Figure 15 : Profil piézométrique le long de la nappe alluviale à plusieurs périodes (HGM Environnement, 2011).

La nappe supérieure est libre dans la partie amont. Elle devient captive dans la zone littorale sous la couverture de limons. La nappe inférieure est mise en charge sous la nappe supérieure dans la basse plaine alluviale.

Les nappes alluviales sont étroitement liées aux cours de la Giscle et de la Môle. D'une manière générale, un équilibre s'est instauré (sens de drainage fonctions des saisons), sauf pour la Môle en amont de Cogolin, où des secteurs de perte des cours d'eau sont avérés (Figure 16).

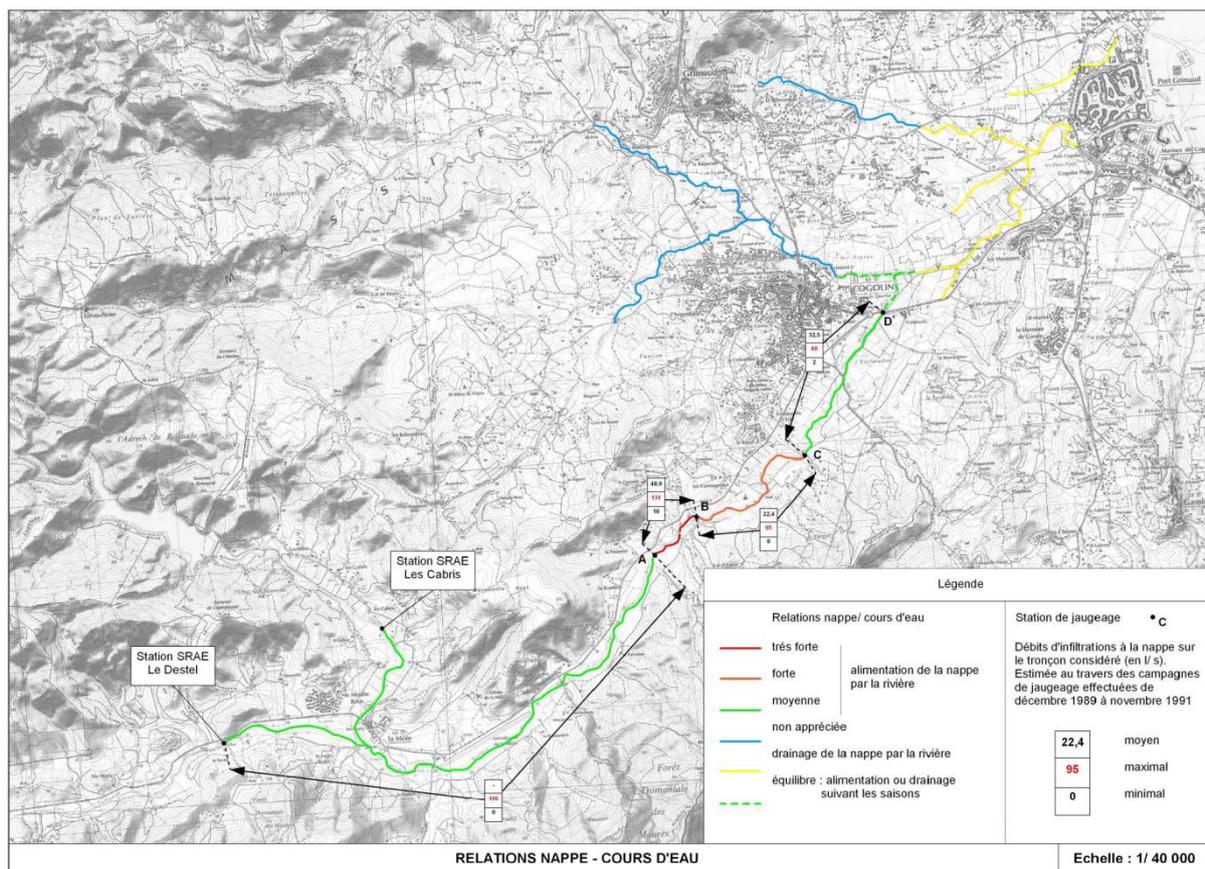


Figure 16 : Relations nappe – cours d’eau (HGM Environnement).

Les nappes alluviales sont essentiellement alimentées par les précipitations, et par le substratum métamorphique par ruissellement. Les nappes sont également rechargées artificiellement par des lâchers du barrage de la Verne (de l’ordre de 0,6 millions de m³/an) permettant de soutenir le débit de la Môle, et alimentant indirectement la nappe de la Môle en saison estivale (Figure 17).

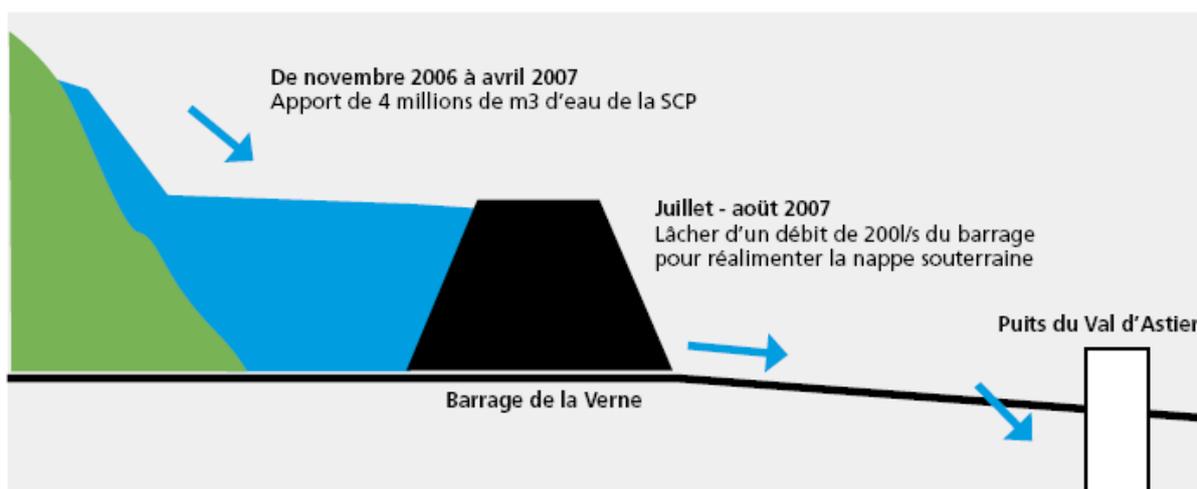
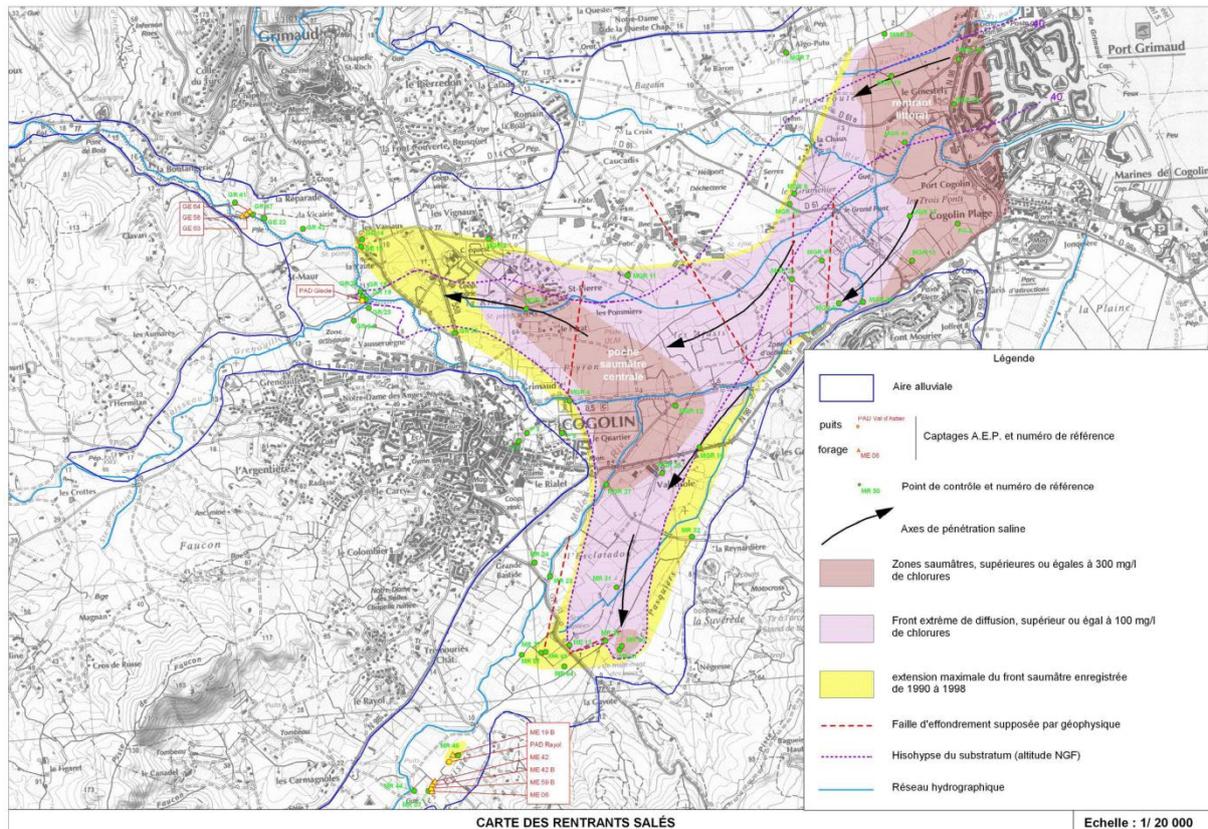


Figure 17 : Schéma d’alimentation des nappes par le lâcher du barrage de la Verne (SIDECM).

Dans la zone littorale, la proximité de la mer engendre une intrusion d’eau salée à l’intérieur des terres. Les observations montrent des teneurs atteignant 23 mg/l à 30 m de profondeur, au sein de la

nappe inférieure. En nappe supérieure, l'écoulement permanent des eaux douces vers la mer maintient une salinité des eaux relativement faible (Figure 18).



Le bureau HGM ENVIRONNEMENT a effectué en 1980, pour le SIDECEM, une étude par simulation mathématique des effets des aménagements (ouvrages de pompages) sur la position du front salé littoral. Cette étude permet la gestion des pompages en fonction du « biseau » salé et de mieux les intégrer dans un schéma général d'aménagement. Des simulations par analogie électrique de la nappe ont également été effectuées.

Ces nappes d'eau souterraine sont très sensibles à la sécheresse. Elles sont fortement vulnérables aux éventuelles pollutions de surface, en raison de leur faible profondeur et de la forte perméabilité des alluvions. Toutefois, dans la zone littorale, la couverture de limons assure une protection des eaux souterraines qui deviennent moins vulnérables.

4/ la gestion intégrée des ressources en eau dans le BV de la Giscle

Le SIDECM (Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau de la Corniche des Maures regroupe les communes du Rayol, Cavalaire, la Croix-Balmer, Ramatuelle, Gassin, la Môle, Cogolin, Saint-Tropez, Grimaud et Plan-de-la-Tour, et peut-être bientôt de Sainte-Maxime. La carte de la Figure 19 reprend le schéma de distribution de l'eau :



Figure 19 : Schéma de distribution de l'eau, gérée par le SIDECM.

Dans l'esprit du SIDECM, la gestion intégrée est « une gestion raisonnée capable de préserver durablement les équilibres quantitatifs et qualitatifs des ressources ».

Pour cela, elle doit être en mesure de prendre en compte les besoins des autres milieux et éléments de notre environnement. Cette notion de partage de la ressource avec les autres éléments - minéraux, végétaux, animaux - n'est pas toujours évidente à faire comprendre au grand préleveur qu'est l'Homme. Elle est au cœur des outils de gestion développés par le SIDECM et de son ambitieux projet d'éducation et de coopération porté par l'association « l'Eau Partagée ».

Une gestion intégrée cherche également à préserver l'équilibre entre l'offre (la ressource) et la demande (les usages), car chacun est aujourd'hui conscient que cette ressource est en quantité finie, et qu'il serait illusoire de poursuivre une politique de l'offre qui court désespérément après une demande en expansion, souvent gaspilleuse. Notamment dans un contexte de changement climatique annoncé.

Agir de manière concomitante sur l'offre et la demande est une volonté politique clairement affirmée par le SIDECM.

Les principaux outils de cette gestion intégrée mis en œuvre par le SIDECM se déclinent donc en deux grands volets :

> **Une politique de l'offre**, axée sur :

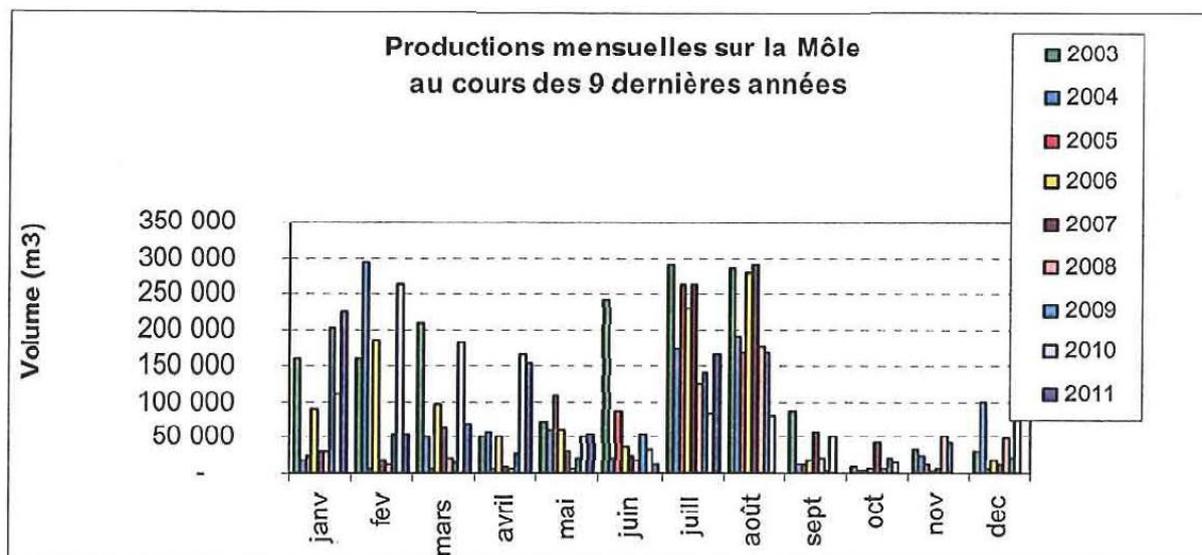
- + La diversification, la surveillance, la protection et la gestion prévisionnelle des ressources
- + La prévision et la mise en œuvre des équipements nécessaires à la satisfaction des besoins du milieu et des usagers

> **Une politique de la demande**, fondée sur :

- + Un prix de l'eau accessible aux petits consommateurs avec une tarification progressive pour inciter aux économies
- + La transparence et l'information des usagers
- + Une opération expérimentale de recherche d'économies d'eau
- + Des actions fortes d'éducation et de coopération, car la gestion durable de l'eau passe par des changements de comportements et la participation des usagers

L'alimentation en eau dans les vallées de la Giscle et de la Môle dépend de trois sources :

- + *L'eau issue du barrage de la Verne* : plus 100 millions de m³ d'eau ont été fournis en 20 ans par le barrage ;
- + *L'eau tirée des nappes alluviales* : en provenance de la vallée de la Môle (selon les années, près des 2/3 des pompages à travers les champs captant du Rayol et du Val d'Astier) mais aussi de la vallée de la Giscle (à travers le champ captant de la Giscle). La Figure 20 illustre les variations de volumes prélevés depuis 2003.



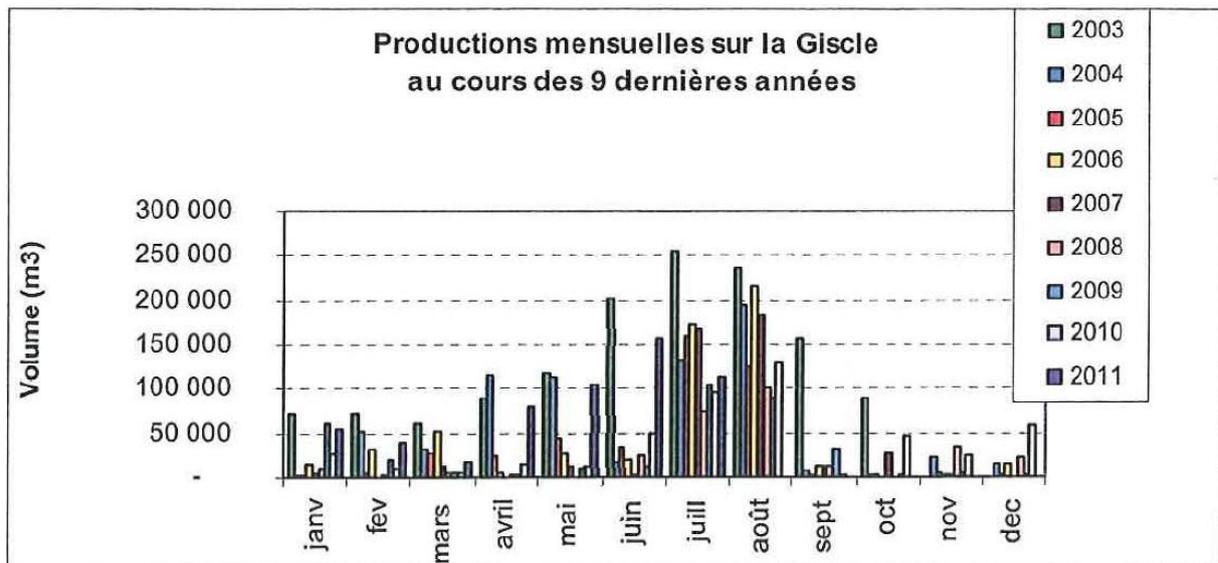


Figure 20 : Productions des champs captants des nappes de la Giscle et de la Môle sur les 9 dernières années (HGM Environnement).

- ✚ L'eau fournie par la Société du Canal de Provence : elle vient en appoint des deux ressources locales, des préconisations sont faites chaque année pour en optimiser le recours. A titre d'exemple, en 2011, HGM Environnement préconisait l'emprunt à la SCP de 150 l/s jusqu'au 15 septembre, puis de 200 l/s jusqu'à la fin de l'année (le surplus d'eau des mois de novembre et de décembre servant à remplir le barrage).

La Figure 21 illustre l'évolution de la gestion des ressources en eau du SIDECM au fil des ans.

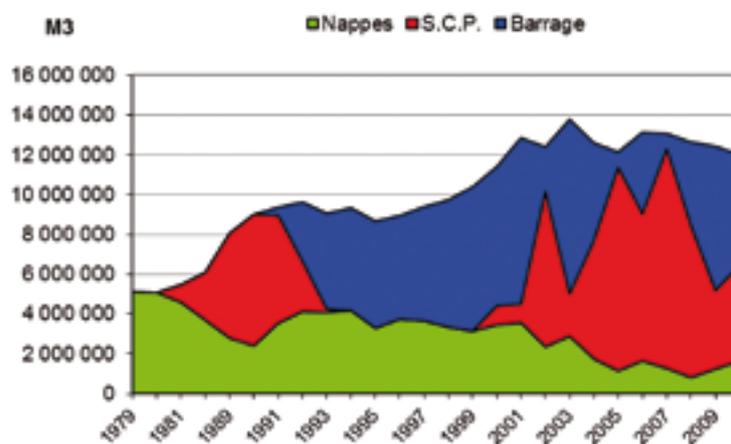


Figure 21 : Evolution des achats et prélèvements issus des trois sources d'alimentation en eau (SIDECM).

- ✚ 1979-1981 : N'ayant pu réaliser le barrage de la Verne, la seule ressource disponible pour faire face à l'augmentation des besoins est la nappe alluviale qui est surexploitée à des niveaux de prélèvement annuel de plus de 5 millions de mètres cubes. Avec pour corollaire une contamination des nappes par le sel.
- ✚ 1982-1992 : L'arrivée de l'eau du Canal de Provence permet de soulager les prélèvements dans les nappes et de faire régresser progressivement le biseau salé vers la zone littorale.
- ✚ 1993-2001 : Après la construction du barrage, le SIDECM privilégie l'utilisation des ressources locales tout en continuant à limiter ses prélèvements dans les nappes. En raison des prix très

élevés de l'eau du Canal de Provence, la politique est celle d'une gestion concurrentielle des ressources

- ✚ 2003 à aujourd'hui : les accords passés avec la SCP pour une gestion coordonnée permettent de moduler les prélèvements en fonction de la climatologie à des tarifs adaptés.

Enfin, pour assurer la gestion prévisionnelle des ressources, le SIDECM a développé avec le concours d'HGM Environnement un outil de gestion : le logiciel MANON. A partir des données climatologiques, il permet de prévoir les prélèvements qui seront pratiqués dans chacune des trois ressources avec la consigne de maintenir dans les nappes un seuil d'eau douce suffisant pour contenir le biseau salé en zone littorale.

L'adaptation des installations permet de stocker, en cas de pluviométrie déficitaire, l'eau fournie par la Société du Canal de Provence dans le barrage de la Verne, mais également de réalimenter les nappes. Grâce à ces outils, le SIDECM s'est donné la possibilité de gérer de façon complémentaire l'ensemble de ses ressources qu'elles soient locales ou régionales.

A titre d'illustration, voici ce qui était préconisé par HGM Environnement en 2011, sur la base de la restitution de MANON :

La simulation a été effectuée avec un quantile de 25 % correspondant à une année sèche. Le mois de début des calculs est août 2011.

Comme hypothèses :

- ✚ les besoins totaux sont estimés sur la base des besoins 2010 ;
- ✚ le niveau du barrage est pris à la cote 81,5 m le 31 juillet 2011.

Comme le montrent les tableaux de la Figure 22, MANON permet d'estimer les besoins d'emprunt à la SCP de 150 l/s jusqu'au 15 septembre, puis de 200 l/s jusqu'à la fin de l'année (le surplus d'eau des mois de novembre et de décembre servant à remplir le barrage).

La marge de sécurité à la fin de l'année 2011 est de 2 771 381 m³ disponibles dans la retenue de la Verne (correspondant à la cote 74,94 m NGF).

	Besoins totaux (m ³)	Lâchers barrage (l/s)	Apports pluie au barrage (m ³)
janvier	437 551	60	1 743 304
février	397 131	60	2 539 763
mars	496 302	60	4 447 287
avril	843 413	60	907 368
mai	1 338 376	60	181 461
juin	1 543 615	60	112 633
juillet	2 066 800	60	167 327
août	2 085 900	60	9 569
septembre	1 272 000	60	7 797
octobre	833 800	60	379 102
novembre	514 200	60	36 017
décembre	463 800	60	8 035
TOTAL	12 292 888		

2011	NAPPE			BARRAGE			SCP
Mois	Volume de flux	Emprunt réserves	Volume pompé (mP ^{3P})	Niveau N.G.F	Volume exploitable	Volume prélevé	Volume emprunté
Janvier	612 544	0	277 930	86.50	7 861 238	22 236	137 385
Février	595 260	0	94 580	86.50	7 861 238	87 977	214 574
Mars	695 166	0	86 320	86.50	7 861 428	122 365	287 617
Avril	619 698	0	230 860	86.50	7 861 428	209 573	403 180
Mai	565 808	0	159 070	85.79	7 468 358	510 382	668 924
Juin	562 846	0	168 690	84.30	6 678 827	760 903	614 022
Juillet	539 838	0	278 800	81.50	5 322 624	1 228 200	559 800
Août	513 886	0	513 886	78.24	3 948 050	1 170 254	401 760
Septembre	439 158	0	200 000	75.91	3 096 786	683 200	388 800
Octobre	437 565	0	0	75.61	2 995 160	298 120	535 680
Novembre	423 256	0	0	75.22	2 864 538	0	514 200
Décembre	428 798	0	0	74.94	2 771 381	0	463 800
Total			2 010 136			5 093 210	5 189 742

PART DES RESSOURCES DANS LA PRODUCTION A.E.P	
Société du Canal de Provence	41.43
Barrage	42.22
Nappe	135

Figure 22 : Simulations des besoins, des lâchers du barrage et des achats auprès de la SCP, ainsi que des volumes pompés dans les nappes pour l'année 2011 à partir du logiciel MANON (HGM Environnement).

5/ Perspective : quelle eau pour les 30 prochaines années ?

La demande croissante, liée notamment à un développement démographique de la zone côtière, risquerait d'engendrer une difficulté à maintenir l'équilibre actuel entre ressource et consommation. C'est pourquoi des Schémas Directeurs menés à différentes échelles ont débouché sur des propositions d'aménagement permettant de faire face à ces défis.

Dans ce contexte, le projet de la Société du Canal de Provence de liaison Verdon / Saint-Cassien / Sainte-Maxime (Figure 1), est apparu aux Collectivités et à l'Agence de l'Eau comme un moyen de réduire la pression sur les ressources locales (barrage et nappes alluviales).

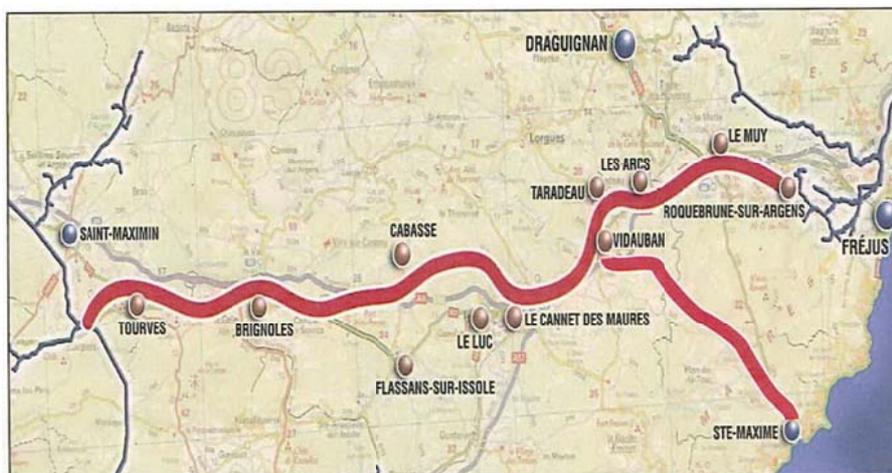


Figure 1 : Tracé de la future liaison SCP Verdon / Saint-Cassien

L'Agence de l'Eau et l'ensemble des partenaires ont souhaité inscrire ces aménagements dans le cadre d'une démarche d'aménagement du Territoire, de protection des milieux naturels et de gouvernance de l'Eau dans le respect du SDAGE et de la Directive-Cadre sur l'Eau (Figure 2).

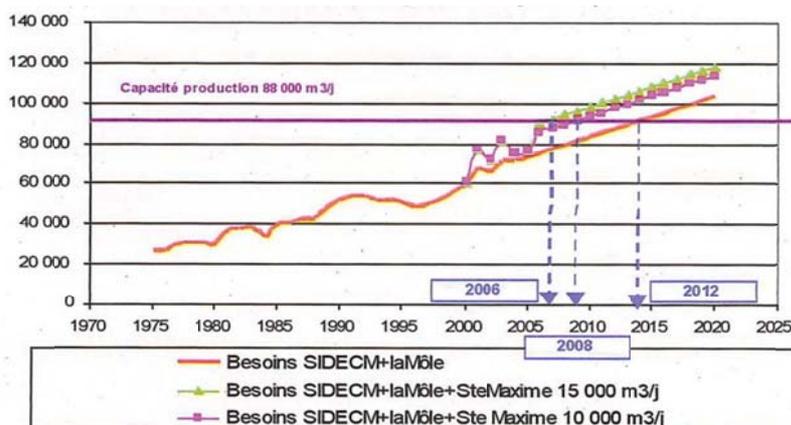


Figure 2 : Bilan besoins-capacité de production en jour de pointe (SIDECM).

Cela traduira notamment par les points suivants :

- ✚ une réduction des prélèvements dans les ressources fragiles ;
- ✚ l'abandon des prélèvements dans la nappe du Préconil qui actuellement alimentent la commune de Sainte-Maxime ;

- + une politique d'économie d'eau, passant notamment par :
 - un rendement des réseaux supérieurs à 85 % ;
 - une politique de tarification de l'eau incitant à la maîtrise de la consommation ;
- + un suivi des données qualitatives et quantitatives.

L'arrivée de l'eau à Sainte-Maxime est prévue pour 2014.

Quelques références bibliographiques utilisées dans ce guide :

EDF (1988) – Barrage de la Verne. Dossier définitif CTPB. Rapport géologique et géotechnique EETGGG/88056C.

HGM Environnement (2011) – Contrôle de la nappe alluviale de la Môle et de la Giscle. Campagne de juillet 2011. Rapport 11-07-039.

L'Eau Partagée (2011) – Le journal des 20 ans du Barrage de la Verne. N° 1 – Mai 2011

Terroirs et Monuments de France – Itinéraires de découverte (1992). Ouvrage collectif sous la direction de Ch. Pomerol. Edition du BRGM.