



HAL
open science

Ressources en eau, hydrologie et hydrogéologie

Bruno Arfib

► **To cite this version:**

Bruno Arfib. Ressources en eau, hydrologie et hydrogéologie. In Villeneuve et al., Mémoire explicatif, Carte géol. France (1/50 000), feuille Aubagne-Marseille, 3ème édition (1044), , 2018. hal-02178686

HAL Id: hal-02178686

<https://hal.science/hal-02178686>

Submitted on 11 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution à la notice de la carte géologique 1/50 000 Aubagne-Marseille,
Ressources en eau, hydrologie et hydrogéologie
Par Bruno ARFIB, Université Aix-Marseille.

Pour citer ce document : Arfib B. (2018) Ressources en eau, hydrologie et hydrogéologie. In Villeneuve et al., Mémoire explicatif, Carte géol. France (1/50 000), feuille Aubagne-Marseille, 3^{ème} édition (1044), pp. 262-271.

Plus d'informations sur : www.karsteau.fr

Ressources en eau

L'écoulement de l'eau de surface et de l'eau souterraine sur la feuille d'Aubagne-Marseille est typique des zones calcaires périméditerranéennes en climat tempéré. L'eau de surface est rare, les écoulements souterrains sont fortement influencés par les vides karstiques, et la répartition des pluies est très hétérogène au cours de l'année, avec des averses de très fortes intensités. La topographie du territoire est formée de collines principalement calcaires, entaillées par des vallons aux écoulements temporaires qui se terminent en mer, ou dans des dépressions karstiques. Seul un fleuve pérenne existe, l'Huveaune, trouvant sa source sur le flanc nord de la Sainte Baume, et se jetant en mer à Marseille. Une particularité réside dans le drainage souterrain qui donne naissance à des sources sous-marines de fort débit dans la baie de Cassis. L'hydrologie et l'hydrogéologie du territoire sont dictées d'une part par la nature des roches et leur fracturation, et d'autre part par la présence des niveaux de base formés par l'Huveaune et la mer qui ont variés au cours du temps.

1- Hydrologie

1.1- Les cours d'eau pérennes

L'Huveaune est le cours d'eau pérenne principal. C'est un fleuve qui prend sa source dans le vallon de la Castelette sur le flanc nord de la Sainte Baume, et dont le cours naturel arrive en mer aux plages du Prado à Marseille. Depuis 1986, la majeure partie du cours d'eau ne s'écoule plus vers son exutoire naturel. Il est dévié au niveau du barrage de la Pugette à Marseille (Sainte-Marguerite, à l'aval de la confluence avec le Jarret) par un tunnel et se rejette dans la calanque de Cortiou. En cas de fortes précipitations, le trop-plein est évacué par l'ancien lit naturel (SIH, 2013). Les sources de l'Huveaune sont en limite nord-est de la carte, sur la commune de Nans les Pins. Ce sont des sources temporaires, taries durant l'été, qui émergent dans la reculée karstique du vallon de la Castelette qui entaille le Plan d'Aups. A 470 mètres d'altitude s'écoulent les sources les plus basses, appelées communément Sources de l'Huveaune, tandis que les sources supérieures sont les sources de la Grotte des Moulins (altitude 500 m.) et de la Grotte de la Castelette (590 m.). Le bassin versant réel de la Haute-Huveaune s'étend au-delà de ses limites topographiques, et inclut une partie du poljé du Plan

d'Aups drainé par infiltration sur la surface lapiazée et dans les tournes. Le cours de l'Huveaune entre les sources et Auriol est caractérisé par des formations travertineuses (travertins ou tufs calcaires) qui tapissent son lit, formant une succession de gours fragiles. L'Huveaune pérenne commence généralement à l'étiage au niveau de la Sambuc, par l'écoulement des sources de Brise et de Lazare (Martin P., 1991). Au niveau de Pont de Joux, l'Huveaune est alimentée en rive droite par le Merlançon, un cours d'eau dont le bassin d'alimentation remonte jusqu'à Saint Savournin et la Bouilladisse (Montagne de Régagnas). A partir d'Aubagne, l'axe de l'Huveaune devient est-ouest, le cours d'eau s'écoule jusqu'à son embouchure sur les conglomérats oligocènes et des dépôts quaternaires, à travers une zone urbaine continue. La qualité et la quantité d'eau s'en trouvent impactées, avec des rejets urbains et industriels multiples. Le lit du cours d'eau est entièrement remodelé par les aménagements sur ce tronçon. A Aubagne, quartier Le Charrel, la station de mesure de la banque Hydro (station n°Y4424040) a mesuré un débit moyen interannuel de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (sur 16 ans entre 1997 et 2012), avec un minimum l'été de quelques centaines de litres par secondes, et un maximum sur la période de mesure enregistré le 14 décembre 2008 avec $64 \text{ m}^3/\text{s}$ de débit instantané maximal ($30 \text{ m}^3/\text{s}$ de débit moyen journalier).

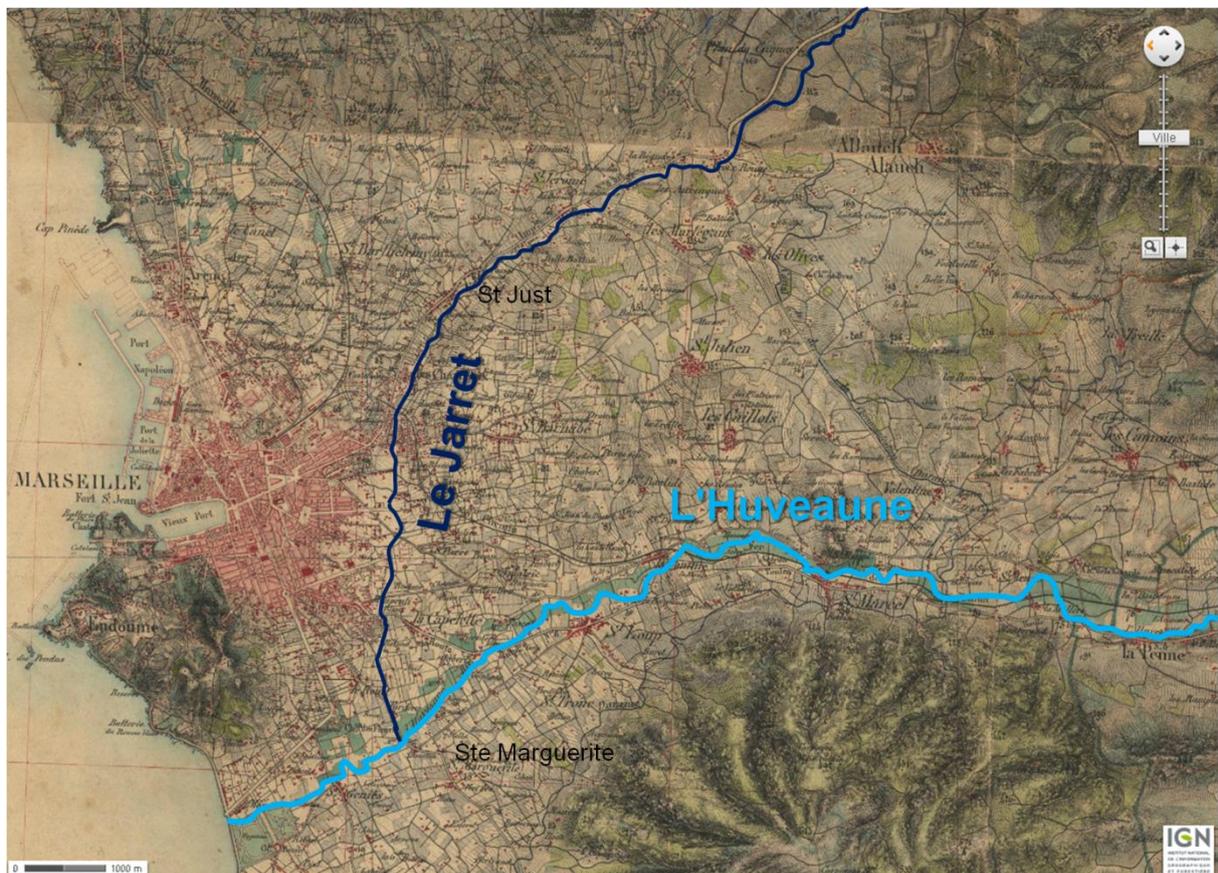


Figure H1 : Carte d'état major de la fin du XIXème siècle. La ville s'étend principalement autour du Vieux-Port. Le Jarret et l'Huveaune traversent des zones agricoles et naturelles non urbanisées. (fond de carte IGN, Geoportail.fr, consulté le 07/12/12).

Deux autres cours d'eau pérennes majeurs existent, affluents de l'Huveaune : le Fauge et le Jarret. Ces cours d'eau sont aujourd'hui fortement perturbés par les activités anthropiques. Le Fauge prend sa source à Gémenos au sud du Pic de Bertagne. La partie supérieure du cours est temporaire, mais l'eau s'écoule toute l'année à partir du Domaine de Saint Pons, alimenté par des sources à proximité de l'abbaye éponyme. Plus en aval, l'eau se perd dans la plaine d'Aubagne-Gémenos, et elle est canalisée pour traverser la zone des Paluds jusqu'à l'Huveaune. Le second cours d'eau qu'il est important de rappeler est le Jarret. Ce cours d'eau

se forme sur les versants sud de l'Etoile et d'Allauch. Il est canalisé sur la quasi-totalité de son écoulement entre Plan de Cuques et sa confluence avec l'Huveaune au niveau du quartier Sainte-Marguerite - Dromel (Palais des Sports, Stade Vélodrome). Il traverse le centre ville de Marseille (Figure H1), entièrement couvert depuis 1954 sous l'axe routier des boulevards Maréchal Juin, Françoise Duparc, Sakakini, et Jean Moulin.

1.2- Les cours d'eau temporaires

Le territoire escarpé de la feuille Marseille-Aubagne est largement entaillé par de nombreux vallons secs. Ces vallons sont empruntés par des écoulements de surface temporaires. Deux types d'écoulements sont distingués : 1) les écoulements alimentés par des sources temporaires, qui perdurent après la pluie, et 2) les écoulements provenant principalement du ruissellement de surface durant la pluie.

1.2.1. Cours d'eau temporaire en lien avec une source

Cet écoulement de surface a une alimentation mixte provenant du ruissellement de surface et du fonctionnement temporaire d'une source drainant les eaux souterraines. Le cours d'eau s'écoule sur une période de quelques jours à plusieurs mois, en relation avec le fonctionnement de la source. Deux vallons présentent cette caractéristique : le vallon de la Serre et le ruisseau de Vède.

Le Vallon de la Serre se trouve sur le flanc sud de la Sainte Baume. Il débouche sur la pointe nord-est du poljé de Cuges les Pins. Il est parcouru par un écoulement alimenté par une source qui se met en eau plusieurs jours après des pluies de forte intensité (aucune étude détaillée n'existe, mais des observations ponctuelles montrent un décalage de deux jours minimum après des pluies entre 20 et 50 mm/jour). Ce cours d'eau est resté sec durant les années de déficit pluviométrique (en 2007-08 par exemple). A l'inverse, en 2011 il a coulé en permanence durant près de trois mois jusqu'en avril (observations T. Lamarque et B. Arfib – Projet Karsteau.fr). Le débit peut dépasser plusieurs centaines de litres par seconde. L'eau est ensuite dirigée dans le poljé vers les bordures où elle s'infiltré dans des zones de perte (nommée localement "embut").

Le ruisseau de la Vède draine le flanc nord-ouest de la Sainte Baume, et forme un affluent rive gauche de l'Huveaune à l'entrée est du village d'Auriol. Ce ruisseau est la confluence de trois vallons : le ravin des Infernets, encadré par les ravins de Daurengue et des Encanaux. Ces deux derniers sont le lieu de drainage de l'eau souterraine au niveau, respectivement, de la source de trop plein des Brayes et des sources des Encanaux. Un fort ruissellement de surface durant les pluies complète cette alimentation d'origine souterraine.

1.2.2. Le ruissellement de surface lors des fortes pluies

Les pluies méditerranéennes de forte intensité, et les pentes fortes du relief accidenté, favorisent le ruissellement de surface. Certes, l'eau de pluie dans les domaines carbonatés karstiques s'infiltré vers la profondeur à travers les discontinuités qui percent les calcaires ou dolomies. Toutefois, l'observation de terrain montre que tous les vallons marqués dans la topographie sont le lieu d'un écoulement de surface temporaire lors des pluies, par ruissellement direct sur les roches compactes, ou par ressuyage du sol (ou écoulement hypodermique). Les zones marneuses moins perméables participent également activement au ruissellement. Il n'est pas question ici de citer tous les vallons du territoire étudié. Seuls

quelque uns aux caractéristiques particulières sont rappelés. On peut donc citer, d'est en ouest :

- les vallons qui convergent vers le poljé de Cuges. Cette vaste dépression endoréique récolte les eaux de tous les vallons alentours, et constitue ainsi le point d'absorption de tous ces écoulements de surface vers la profondeur.

- A partir de la surface du Camp, les hauts de Ceyreste (Le Grand Caunet) et les hauts de La Ciotat (Pas d'Ouillier, Pas de Belle Fille, Route des Crêtes), les vallons entaillent le créta supérieur affleurant et s'organisent en quelques ruisseaux principaux qui rejoignent la mer en traversant La Ciotat. L'eau de surface est drainée dans son bassin versant hydrologique, tandis qu'une partie s'infiltré et peut être transférée vers les bassins versants voisins, comme par exemple l'eau de la perte de Mauregard drainée en direction des sources sous-marines de la baie de Cassis (Arfib et Lamarque, 2012).

- La dépression de Roquefort-La-Bédoule, dans les marnes (ou calcaire marneux) Aptiennes est drainée dans deux directions opposées : (1) vers le nord le long de la percée formée par l'Autoroute jusqu'à Aubagne et rejoint par le ruissellement urbain de Carnoux en Provence ; et (2) vers le sud jusqu'à la plaine de la ferme Blanche en amont du village de Cassis puis jusqu'à la mer par le vallon des Brayes.

- Le haut du vallon du Fauge (Gémenos) récolte des eaux du sud du Pic de Bertagne, et l'écoulement de la source temporaire de la Tourne de Saint Pons.

- Sur le flanc nord du Plan d'Aups, entre le ruisseau de Vède et l'Huveaune amont (Vallon de la Castelette), deux vallons drainent le massif de la Lare par le ruisseau de la Gastaude et le ruisseau de Peyruis, alimentant l'Huveaune en rive gauche.

- Dans le massif d'Allauch, le vallon des Escaouprés est propice au ruissellement sur les dalles calcaires massives, drainant également de nombreuses sources au faible débit (quelques litres par minutes, Source du Chien par exemple).

2- Hydrogéologie

2.1- Les aquifères, aquitards, aquicludes

D'un point de vue géologique, les écoulements sont contraints par la nature lithologique des formations géologiques rencontrées à l'affleurement et en profondeur, ainsi que par le canevas structural qui les découpe. Cinq grands types de roches sont rencontrés : (1) les roches évaporitiques du trias, (2) les roches carbonatées fissurées et karstiques, principalement du trias, jurassique et crétacé, (3) les roches carbonatées marneuses intercalées entre les roches du type précédent, (4) les roches mixtes carbonatées-silicoclastiques du crétacé supérieur, (5) les roches conglomératiques et alluvions d'âge oligocène à quaternaire. L'ensemble de ces terrains présente des propriétés de porosité et de perméabilité susceptibles de stocker de l'eau souterraine ou de la laisser circuler. Au nord de l'Huveaune, et dans la Sainte-Baume, l'événement médio-crétacé lié au bombement durancien a provoqué l'érosion des terrains du crétacé inférieur, et localement le dépôt de bauxite dans d'anciennes dépressions karstiques (massif d'Allauch, hors carte : Mazaugues, Le Revest). La série sédimentaire est alors incomplète. L'histoire karstique de la région commence dès cette période.

2.1.1- Les aquifères

Deux grands types de formations sont aquifères : d'une part les alluvions et colluvions, et d'autre part les roches carbonatées. Les alluvions et colluvions quaternaires sont concentrées dans la plaine d'Aubagne et de Cuges les Pins au sein de vastes dépressions. Le long de l'Huveaune, le quaternaire est peu épais et repose sur les poudingues oligocènes. Les aquifères de la carte Marseille-Aubagne sont donc représentés principalement par les roches carbonatées : calcaires, dolomies, marnes, et calcarénites quartzeuses (Figure H2 illustrant le sud de la carte Marseille-Aubagne). Ces roches forment un milieu hétérogène vis-à-vis de l'écoulement de l'eau souterraine. Elles sont affectées par une intense fracturation, reprise par la karstification verticale et horizontale qui traverse sans discernement tous les âges, et tous les types de roches. Des cavités karstiques s'observent partout, par exemple dans le crétacé supérieur calcarénitique : l'Aven de Mauregard, dans les calcaires turoniens de plateforme : le Colombarium, dans l'urgonien : l'aven des Marseillais ou la rivière de Port-Miou). Cette karstification se développe profondément sous le niveau de la mer actuel. Elle a été observée en spéléo-plongée dans la rivière de Port-Miou jusqu'à 223 mètres de profondeur. Elle est liée à la baisse drastique du niveau de la mer Méditerranée lors de la crise de salinité Messinienne, et à l'adaptation du karst lors des variations du niveau de base (Audra et al. 2004).

Bien que l'ensemble des terrains carbonatés soient aquifères, les propriétés pétrophysiques des terrains sont contrastées. Les terrains dolomitiques présentent une porosité de pore et une perméabilité matricielle non négligeables. Les dolomies (principalement jurassiques) jouent le rôle de réservoir régional. Les calcaires compacts à faciès urgonien (barrémien principalement) présentent une propriété réservoir liée à leur fracturation et leur karstification. Leur rôle réservoir est moindre, mais ils jouent un rôle majeur pour le transfert des fluides (descendant ou ascendant) vers leur résurgence au niveau de base marin. Le crétacé supérieur carbonaté-gréseux montre, comme la dolomie, une double porosité/perméabilité liée à la matrice et aux fractures.

2.1.2- Les aquitards

Les roches carbonatées marneuses et les poudingues oligocènes forment localement des aquitards. Les propriétés des poudingues sont peu connues. Les marnes, par leur variation d'épaisseur et leur fracturation, ne représentent pas un écran imperméable bien qu'elles créent un frein à l'écoulement lorsqu'elles sont présentes. Elles peuvent être traversées par des circulations karstiques (exemple du karst de l'embut des Enfers-Riboux dans le Bajocien-Bathonien, ou le résultat du traçage artificiel de 2011 à travers l'Aptien entre la perte de Mauregard (Crétacé sup.) et Port-Miou (Barrémien)).

2.1.3- Les aquicludes

Les formations strictement imperméables sont rares sur le territoire étudié, limitées à quelques niveaux argileux dans les dépôts oligocènes ou quaternaires. La bauxite, bien qu'elle soit peu ou pas perméable, n'est déposée qu'en poches dans les paléo-dépressions karstiques, et forme donc un écran discontinu.

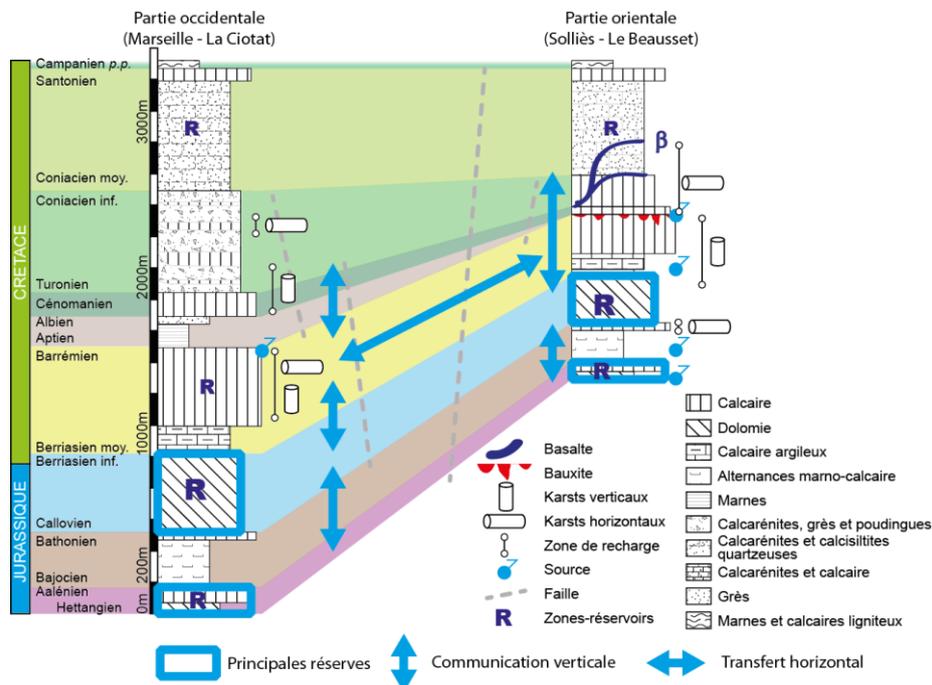


Figure H2 : Synthèse stratigraphique, hydrogéologique et karstologique de l'Unité du Beausset (Fournillon, 2012). Le log de gauche (partie occidentale) intéresse la carte géologique de Marseille-Aubagne, tandis que le log de droite montre la continuité de l'Unité sur la feuille Toulon.

2.2- Les sources

En zone carbonatée karstique, les sources constituent les exutoires des nappes d'eau souterraines. Sur le territoire de la feuille Marseille-Aubagne, les sources pérennes au débit conséquent (>100 l/s) sont rares. L'eau souterraine est drainée tout au long de l'année par trois exutoires principaux : les sources du vallon de Saint Pons (qui donnent naissance au Fauge), les sources sous-marines de Sugiton et les sources sous-marines de la Baie de Cassis (Port-Miou et Bestouan). Parmi celles-ci, les sources de Port-Miou et Bestouan sont les exutoires majeurs de la Basse-Provence calcaire, avec un débit d'étiage de plusieurs mètres-cubes par secondes.

Le massif d'Allauch et Garlaban

L'eau de la source des Camoins est captée pour l'établissement thermal. Cette source avait un débit de 300 à 500 m³/jour. Elle sourd au sud-ouest du massif du Ruissatel, dans les dépôts de l'Oligocène, s'écoulant entre des laminites gypseuses et carbonatées contenant des lits et nodules de soufre (Rousset et al. 1996). L'eau est froide (environ 14°C) et minéralisée : sulfurée et sulfatée-calcique. Sa minéralisation est issue du soufre natif préservé dans les dépôts d'une cuvette lacustre ou lagunaire de l'oligocène, en lien avec l'activité bactérienne.

Les autres sources du massif d'Allauch et du Garlaban ne sont que des sources de faible débit, le plus souvent temporaires, à sec l'été (la source du Chien dans le Vallon des Escaouprés, et la source de Barquieu au nord du Garlaban, sont parmi les plus facilement visibles).

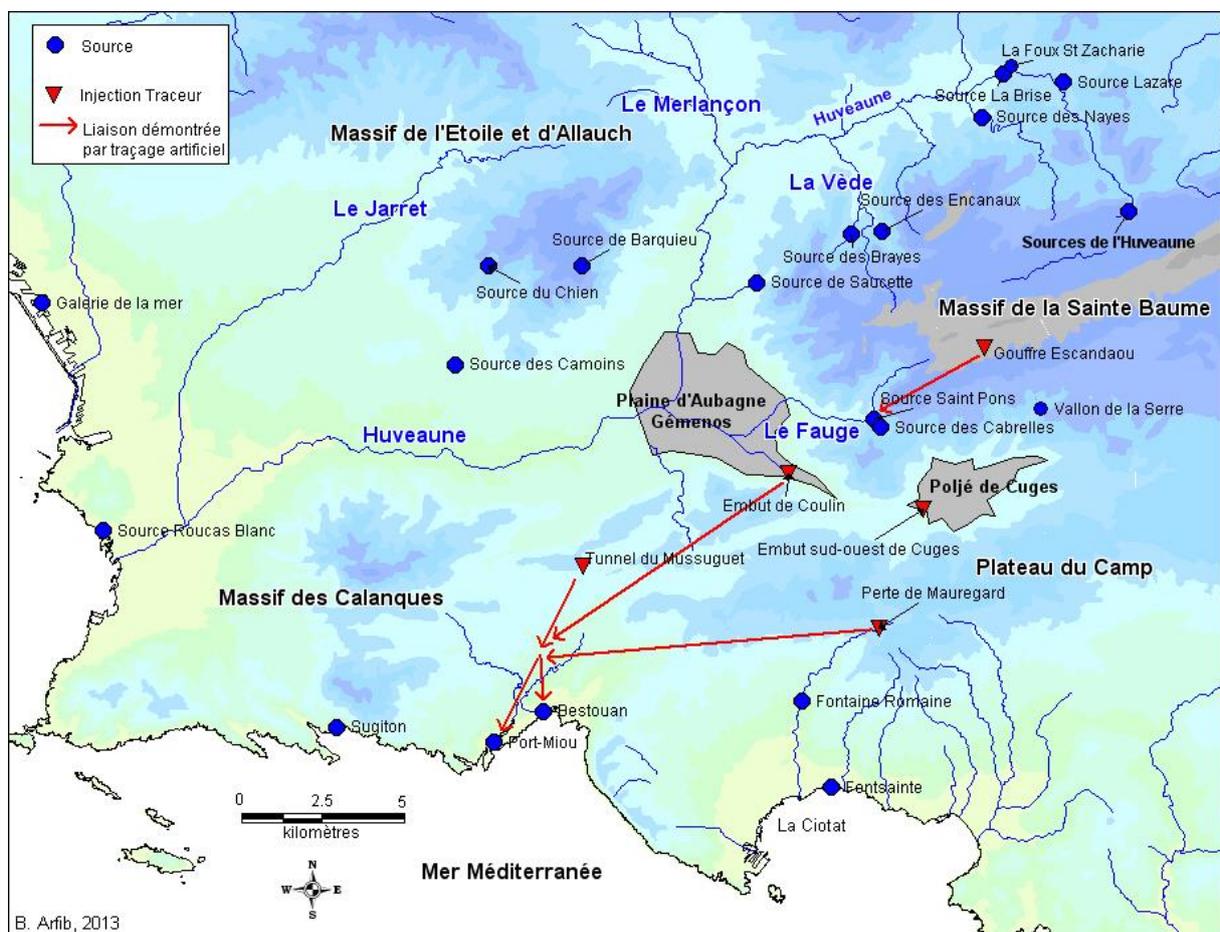


Figure H3 : Localisation des principaux cours d'eau et principales sources de la carte géologique Marseille-Aubagne

Le massif de la Sainte Baume

L'Huveaune prend sa source dans le vallon de la Castelette, au niveau de plusieurs exurgences étagées dans le vallon. Les sources karstiques de la Grotte de la Castelette (les plus hautes), ainsi que la Grotte du Moulin fonctionnent en trop-plein de débordement durant les crues. Sous l'altitude 450 m, des dépôts travertineux tapissent le fond du cours d'eau, développés par la précipitation du carbonate calcium contenu dans l'eau de la source principale de l'Huveaune ayant une forte pression partielle en CO₂. A l'étiage toutes les

sources tarissent et le vallon est sec. Le cours de l'Huveaune devient pérenne à partir des sources Lazare et de la Brise et la Foux à l'amont de Saint Zacharie. Les affluents rive gauche de l'Huveaune sont soutenus par des sources karstiques au débit très variable, fort en crue, faible ou nul durant l'étiage : source des Naves, sources des Encanaux, source temporaire des Braves, source de Saucette. L'ensemble de ces sources a un bassin d'alimentation local, de faible extension (Coulier 1985). Les sources sont toutes positionnées autour du massif de la Sainte Baume, au niveau de base imposé par la vallée de l'Huveaune.

La source de Saint Pons est la source pérenne principale du massif de la Sainte Baume. Elle draine la terminaison ouest de la chaîne de la Sainte Baume (Coulier 1985). Elle appartient au réseau de suivi de la Banque Hydro (n°Y4425010). Son débit varie entre 10 l/s et plus de 500 l/s, avec une moyenne proche de 100 l/s. La source des Cabrelles est un exutoire de trop-plein.

Sur le flanc sud de la Sainte Baume (sur le territoire de la carte géologique), seul le vallon de la Serre est alimenté par une source temporaire. Cette source est restée sèche durant les périodes de déficit pluviométrique (2007-08 par exemple), mais elle coule habituellement durant plusieurs mois durant l'hiver. Le cours d'eau arrive dans la plaine de Cuges les Pins, où il est dévié vers une zone de perte pour s'infiltrer (jusqu'à plusieurs centaines de litres par seconde). Le débit est décalé de plusieurs jours suite aux précipitations.

Le Crétacé supérieur de l'Unité du Beausset (du plateau du Camp à la baie de La Ciotat)

Le secteur qui s'étend au sud de Cuges les Pins jusqu'à la baie de La Ciotat correspond à la zone d'affleurement du crétacé supérieur de l'Unité du Beausset. Quelques sources temporaires se trouvent sur les versants, d'un faible débit (source de Fontblanche, source de la Glacière, Fontaine Romaine). Sur le littoral, la Fontsainte sourd en inter-bancs dans les calcarénites, sous la plage, formant un bouillonnement à la surface de la mer durant les crues, et à sec durant l'étiage estival. Le traçage réalisé en 2011 sur l'aven-perte de Mauregard (Arfib et Lamarque 2012) montre qu'une partie de l'eau souterraine infiltrée sous la surface du Camp est drainée en direction de la baie de Cassis. Des mesures de salinité en mer (Fournillon 2012) dans la baie de La Ciotat et Cassis montrent que des venues d'eau souterraine en mer existent de manière diffuse dans toute la baie de La Ciotat dans l'aquifère multicouche des calcarénites quartzesuses.

Le massif des Calanques de Marseille à Cassis

Le massif des Calanques est caractérisé par son aridité. Aucune source ne coule à la surface de ce territoire calcaire et dolomitique. Seules des sources côtières et sous-marines existent. Deux zones préférentielles d'arrivée d'eau sous-marine sont connues au droit des calanques de Sugiton et de Port-Miou et Bestouan (Cassis). L'eau souterraine forme des sources sous-marines qui impactent la salinité et la température de l'eau (l'eau est froide en été pour les baigneurs). Seule la source principale de Port-Miou a fait l'objet d'un suivi scientifique continu et d'une estimation de ses débits (Cavalera 2007, Lismonde et al. 2011). Son débit d'étiage est supérieur à 2 m³/s en moyenne (soit plus de 10 fois le débit de l'Huveaune). Le débit maximum sur la période 2003-2012 (Arfib, com. personnelle) a été enregistré aux mêmes dates que la crue de l'Huveaune de décembre 2008, avec un débit proche de 50 m³/s pendant plusieurs jours. Les sources de la baie de Cassis sont l'exutoire d'un vaste bassin d'alimentation de plusieurs centaines de kilomètres carrés (Cavalera, 2007, donne une valeur supérieure à 400 km²) qui draine au moins la partie occidentale de l'Unité du Beausset et la Sainte-Baume. La continuité hydraulique de la Sainte Baume à la mer a été relevée par les auteurs successifs qui ont étudié ce domaine (Coulier 1985, Martin 1991, Cavalera 2007, Fournillon 2012). Les plongées profondes des spéléoplongeurs (parmi entre-

autres Touloumdjian, Douchet, Meynier, Meniscus) ont atteint 223m de profondeur sous le niveau de la mer dans le puits terminal de la galerie karstique noyée de Port-Miou (Méniscus, Mai 2012). Port-Miou et Bestouan se trouvent être les exutoires actuels du réservoir régional jurassique, connecté jusqu'au niveau de la mer à travers les calcaires urgoniens sus-jacents.

La baie de Marseille

La source du Roucas Blanc émerge sur la pointe nord des plages du Prado (Marseille), au pied de la butte du Roucas Blanc. Cette source est thermo-minérale, sortant d'une fissure du calcaire à plus d'un mètre au dessus du niveau de hautes-eaux de la mer (Michel 1875). Sa température est de 20,5 à 22°C, et sa minéralisation est chlorurée sodique. Son débit était de 3 litres par minute. Elle a fait l'objet d'une exploitation dans un établissement thermale ouvert en 1875 pendant quelques années (Bonillo et al. 1992). Elle est aujourd'hui située dans l'hôtel du Palm-Beach.

La galerie de la mer

La galerie de la mer permet le transfert d'eau souterraine du nord du territoire de la carte géologique, vers Marseille. La galerie de la mer est un tunnel de 14,68 km de long, creusé entre 1890 et 1905, qui sert pour évacuer les eaux d'exhaure des mines de Gardanne (puits Gérard) et pour acheminer le charbon vers Marseille sur des rails. La galerie est un ouvrage linéaire reliant les anciennes mines de l'altitude 18 m jusqu'à la mer, dans le port industriel de Marseille. Cette galerie souterraine est toujours entretenue (BRGM, mission après-mine) et utilisée pour le drainage des mines abandonnées depuis 2003. L'eau minière transite dans une canalisation PEHD, avec un débit d'environ 1200 m³/h, et est rejetée en mer à 830 m de la côte. Environ 2000 m³/h supplémentaires d'eau souterraine sont captés par la galerie sur son linéaire, et transite dans une cunette à surface libre jusqu'au bassin portuaire Pinède. Les venues d'eau souterraine constituent un ressource en eau de secours pour la métropole marseillaise.

2.3- Les traçages artificiels

Le territoire de la carte Marseille-Aubagne étant principalement caractérisé par des roches carbonatées et potentiellement karstifiées, le traçage artificiel est une méthode particulièrement bien adaptée pour l'étude des circulations d'eau souterraine. Il renseigne sur les limites de bassins d'alimentation des sources et les vitesses d'écoulement. Un tableau synthétique des traçages inventoriés est donné ci-dessous.

Les traçages de Coulier (en 1983 et 1984) portent sur la partie occidentale de la chaîne de la Sainte Baume, drainée en direction du vallon du Fauge (source de Saint Pons) et du vallon des Encanoux. Martin (1991) cite un autre traçage réalisé le 08/04/1984 sur le plan d'Aups, mais les résultats sont douteux, et ne sont donc pas repris dans cette synthèse.

Les autres traçages inventoriés s'intéressent au bassin versant des sources sous-marines de Port-Miou et Bestouan (Cassis). Trois traçages ont été détectés, montrant une connexion hydraulique des sources : 1) avec la plaine de Gémenos-Aubagne drainée vers le sud, 2) avec les calcaires urgoniens affleurant à Cassis au Mussuguet, 3) avec le Crétacé supérieur de Ceyreste dans le secteur du Grand Caunet au sud du plateau du Camp. Les traçages réalisés dans l'embut sud-ouest du poljé de Cuges les Pins n'ont pas été détectés. Ce dernier résultat est probablement lié aux conditions de réalisation de l'essai de traçage (traceur, quantité, adsorption, dilution...) ; car le contexte géologique et hydrogéologique régional permet de

conclure par ailleurs que le poljé de Cuges les Pins ne peut être drainé qu'au niveau des sources sous-marines de Cassis.

| Lieu d'injection | Date d'injection | Traceur et quantité utilisés | Lieu de restitution | Référence bibliographique |
|---|------------------|------------------------------|--|-------------------------------|
| Grand aven des Encanaux (rivière souterraine) | 02/07/1983 | 238 g. fluorescéine | Source supérieure des Encanaux | Coulier, 1985 |
| Gouffre de l'Escandaou | 14/01/1984 | 810 g. fluorescéine | Source Saint Pons, Galerie Saint Pons | Coulier, 1985 |
| Embut de Coulin (Gémenos) | 10/12/1964 | 25 kg fluorescéine | Non détecté aux sources sous-marines de Cassis | Durozoy et Paloc, 1969 (BRGM) |
| Embut de Coulin (Gémenos) | 06/12/1965 | 50 kg fluorescéine | Port-Miou et Bestouan (Cassis) | Durozoy et Paloc, 1969 (BRGM) |
| Tunnel du Mussuguet (Cassis) | 01/12/1966 | 50 kg fluorescéine | Port-Miou et Bestouan (Cassis) | Durozoy et Paloc, 1969 (BRGM) |
| Embut de Caranquet (sud-ouest Cuges les Pins) | 1970 | 1,5 kg fluorescéine | Non détecté | Monteau, 1971 |
| Embut sud-ouest de Cuges les Pins | 18/01/2011 | 50 kg acide amino G | Non détecté | Arfib et Lamarque, 2011, 2012 |
| Aven de Mauregard (Ceyreste) | 08/02/2011 | 30 kg sulforhodamine B | Port-Miou et Bestouan (Cassis) | Arfib et Lamarque, 2011, 2012 |

Tableau 1 : Synthèse des traçages artificiels réalisés sur le territoire de la carte géologique

2.4- Les entités hydrogéologiques et les grandes directions d'écoulement sur le territoire de la carte Marseille-Aubagne

Le schéma hydrogéologique de la carte Marseille-Aubagne est caractérisé par l'empilement des terrains sédimentaires du trias au crétacé supérieur qui forment un vaste aquifère multicouche de plusieurs milliers de mètres d'épaisseur, découpé en surface par la vallée de l'Huveaune, et limité au sud par la mer. La dépression d'axe est-ouest du bassin oligocène de Marseille marque une limite dont le rôle hydrogéologique est encore peu connu ; elle sépare deux zones géographiques : le massif d'Allauch, de l'Etoile et du Garlaban au nord, et au sud et à l'est le massif des calanques, l'unité du Beausset et la Sainte-Baume. La nappe d'eau souterraine se trouve généralement en équilibre avec le niveau de base imposé par la vallée de l'Huveaune et la mer. Les massifs carbonatés, en grande partie karstiques, de par leur perméabilité en grand et la position du niveau de base, présentent une zone non saturée de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Deux axes de drainage de ce territoire peuvent être individualisés : 1) Le fleuve Huveaune alimenté par des cours d'eau affluents temporaires drainant des sources karstiques ; et 2) Des sources sous-marines du littoral des calanques et de la baie de la Ciotat qui constituent les points de drainage majeurs.

- Les massifs d'Allauch et Garlaban ne présentent pas de source majeure à leur base. L'eau infiltrée est drainée vers la mer dans une direction précisément non connue.

- Les calanques de Marseille à Cassis forment un massif calcaire drainé intégralement par des sources sous-marines, dont les principales sont Sugiton et Port-Miou et Bestouan. Les sources de Port-Miou et Bestouan sont les exutoires principaux des massifs environnants, avec une continuité hydraulique de la Sainte-Baume jusqu'à la mer. Le drainage profond de l'eau souterraine entraîne une salinisation de l'eau souterraine par l'intrusion saline, qui affecte la qualité des sources durant toute l'année (Cavalera, 2007).

- La plaine de Gémenos-Aubagne, située à l'est de l'Huveaune, forme un territoire au faible dénivelé composé d'un ensemble hétérogène de terrains oligocènes à quaternaires. Une nappe

libre s'écoule, étudiée entre 1950 et 1970 avant les aménagements urbains. La carte piézométrique (Naud, 1969) montre que l'eau souterraine est drainée en partie en direction des massifs calcaires du Douard au sud. Cette eau, étudiée par traçage artificiel (Durozoy et Paloc, 1969), participe au débit des sources sous-marines de Cassis.

- Les terrains du Crétacé supérieur de l'unité du Beausset s'étendent du plateau du Camp à la baie de La Ciotat. Ils sont séparés du massif des calanques par les calcaires argileux de l'aptien. Cet écran est considéré comme une limite régionale, mais peut être localement non étanche comme l'a montré le traçage de l'aven de Mauregard (2011). Les calcarénites quartzieuses forment un aquifère multicouche drainé dans la baie de La Ciotat par des venues d'eau diffuses en mer (Fournillon, 2012).

- Le poljé de Cuges les Pins reçoit l'eau de surface provenant des vallons alentours. Il est drainé par trois pertes principales (les "embuts"), au contact entre les calcaires et la plaine. Les pertes au sud sont partiellement colmatées, et la plaine peut s'inonder dans sa partie basse au sud-ouest. L'embut nord-est reçoit les eaux détournées du vallon de la Serre.

- Le versant sud de la Sainte Baume constitue une vaste surface d'infiltration de l'eau de pluie. L'eau souterraine émerge localement au niveau de la source du Vallon de la Serre. La majeure partie de l'eau infiltrée circule en profondeur pour ressortir à la mer à Cassis.

- Le versant nord de la Sainte Baume est drainé par les sources temporaires alimentant l'Huveaune (vallon de la Castelette) et ses affluents. Une partie de l'eau d'infiltration est susceptible d'être drainée en profondeur jusqu'aux exutoires régionaux sous-marins de Port-Miou et Bestouan. La dépression (ou poljé) du Plan d'Aups s'ennoie temporairement ; elle est drainée par deux pertes, appelées tournes, et une troisième un peu plus à l'ouest.

2.5- Les sources karstiques côtières de Port-Miou et Bestouan (baie de Cassis)

Les sources karstiques côtières de Port-Miou et de Bestouan se déchargent en mer dans les calanques éponymes de la baie de Cassis. Elles constituent une particularité hydrogéologique régionale de premier ordre à plusieurs titres : 1) les sources émergent de galeries karstiques noyées explorées sur plusieurs kilomètres, 2) un barrage souterrain construit vers 1970 à Port-Miou donne accès à un laboratoire expérimental unique, 3) le bassin versant des sources est gigantesque, de plusieurs centaines de km², 4) l'eau est saumâtre, mélange à grande profondeur entre l'eau douce des pluies infiltrées et l'eau de mer entrant dans l'aquifère.

2.5.1- Les galeries karstiques noyées

Les sources sous-marines donnent accès à des galeries karstiques noyées (Arfib et Douchet, 2011; Asso CRM, 2013) qui se développent en direction du nord, explorées et topographiées depuis les années 1950 par des spéléo-plongeurs (par exemple C. Touloumdjian, B. Léger, F. Leguen, M. Douchet, J. Meynié, X. Meniscus). Les conduits sont de larges dimensions : plusieurs mètres à dizaines de mètres de diamètre, et sur un développement de 2000 mètres à Port-Miou et 3000 m à Bestouan (Figure H4). Le réseau karstique de la source de Port-Miou se développe sous le niveau de la mer, à plus de 223 mètres de profondeur, soit bien plus bas que le niveau atteint par les régressions quaternaires. Ces sources sont l'exutoire d'un réseau de drainage profond, probablement mis en place lors de la crise de salinité messinienne.

2.5.2- Le site expérimental du barrage souterrain de Port-Miou

La source de Port-Miou a fait l'objet d'aménagements dans les années 1970 par le groupement de la SEM, le BRGM et Coyne et Bellier (Asso CRM, 2013). Un barrage souterrain a été construit à 500 mètres de la mer dans les terres, barrant la galerie karstique naturelle. L'objectif était de faire diminuer la salinité de la source. L'eau est restée saumâtre, montrant que l'intrusion d'eau de mer dans l'aquifère est profonde, et très en amont du barrage. Ce site constitue aujourd'hui un laboratoire souterrain expérimental unique pour l'étude du karst côtier et des ressources en eau en zone côtière méditerranéenne.

2.5.3- Le bassin versant d'alimentation des sources

Les sources de Bestouan et Port-Miou drainent un vaste bassin d'alimentation principalement calcaire et dolomitique qui s'étend jusqu'à la Sainte Baume et peut-être au-delà (Cavalera et al. 2010). Elles sont les exutoires de l'aquifère multicouche régional formé par l'empilement des roches carbonatées et silicoclastiques du Trias au Crétacé. Elles drainent également une partie des eaux des alluvions oligocènes et quaternaires de la plaine d'Aubagne. La superficie du bassin d'alimentation n'est toujours pas connue avec exactitude en 2013. Cavalera (2007) propose une superficie minimale de 400 km². Le débit des sources est supérieur à celui de l'Huveaune à l'aval d'Aubagne, aussi bien à l'étiage qu'en crue. A Port-Miou, les mesures au barrage souterrain donnent un débit moyen annuel entre 5 et 7,2 m³/s (Tableau 2). Bien qu'une part de l'eau soit salée, les sources de Port-Miou et Bestouan représentent les exutoires principaux de la basse Provence calcaire, formant les deuxièmes plus importantes sources de la Région PACA après la Fontaine de Vaucluse (débit moyen 21 m³/s).

| Période de mesures | Débit moyen (m ³ /s) | Salinité moyenne (g/l) | Proportion d'eau de mer (%) | Origine des données |
|--------------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------------|---|
| 01/09/2005 au 31/08/2006 | 5 m ³ /s | 11,7 g/l | 31 % | Thèse T. Cavalera (Direction E. Gilli, C. Rousset) – correction des données Arfib & Lismonde 2013 |
| 01/01/2011 au 31/12/2011 | 7,2 m ³ /s | 8,7 g/l | 23% | Arfib – projet KarstEAU |

Tableau 2 : Mesures sur la source sous-marine de Port-Miou sur le site du barrage souterrain

2.5.4- L'intrusion saline et la qualité de l'eau des sources sous-marines

Les sources de Bestouan et de Port-Miou sont saumâtres, salées par de l'eau de mer qui entre dans l'aquifère à grande profondeur par le phénomène naturel d'intrusion saline. Elles drainent l'eau douce continentale et l'eau de mer entrée dans l'aquifère en amont des points explorés par les spéléo-plongeurs, c'est-à-dire à plusieurs kilomètres de la côte. Ce n'est donc pas à leur débouché en mer que les sources sont salées, même si une langue d'eau salée rentre dans les galeries karstiques sur quelques centaines de mètres. Lors des crues, l'eau devient plus douce, mais elle garde toujours une salinité résiduelle qui la rend impropre à la consommation, y compris lors des crues exceptionnelles (comme celle de décembre 2008 ayant un débit de 50 m³/s). Bestouan et Port-Miou se distinguent tout de même car Bestouan présente une salinité environ deux fois moins élevée que celle de Port-Miou à l'étiage. Le mécanisme de salinisation de l'eau reste encore un mystère car les données physico-chimiques enregistrées sur les sources en continu ne permettent pas encore de discriminer si l'intrusion saline a lieu principalement par la matrice fissurée des calcaires ou par un paléo-drain profond qui se serait creusé lors de l'abaissement du niveau de la mer.

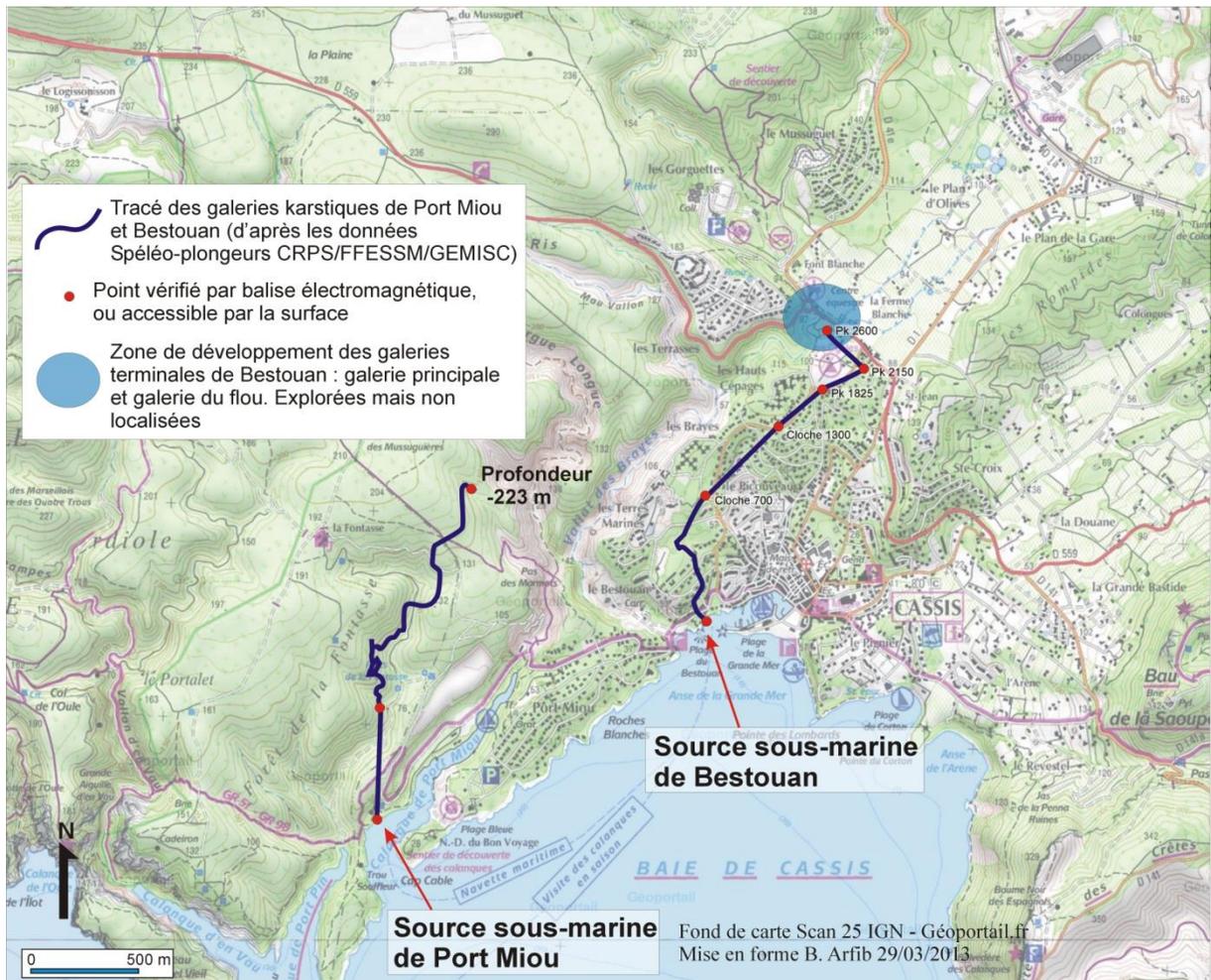


Figure H4 : Tracé schématique des galeries karstiques noyées des sources de Bestouan et Port-Miou dans la baie de Cassis (d'après les données topographiques des spéléo-plongeurs CRPS/FFESSM/GEMISC. Modifié d'après Arfib et Douchet, 2011)

BIBLIOGRAPHIE :

- 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. (2011) Traçages artificiels KarstEAU 2011 - Rapport de synthèse des injections d'Acide Amino G, Sulforhodamine B et Fluorescéine à Cuges les Pins, Ceyreste et Signes. Université de Provence. 53 pages
- Arfib B., Lamarque T. (2012) Résultats préliminaires et premières interprétations du traçage KarstEAU du 08 février 2011 par injection de Sulforhodamine B à la perte de Mauregard (Ceyreste) (version du 09/02/2012). Résultats positifs sur les sources sous-marines de la baie de Cassis : Bestouan et Port Miou. Aix-Marseille Université. 14 pages
- Asso CRM (2013) Cassis et ses rivières. Association Cassis La Rivière Mystérieuse, Louis Potié. 93 pages.
- Audra, P., L. Mocochain, H. Camus, E. Gilli, G. Clauzon, J.-Y. Bigot (2004) The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the Mediterranean Sea. Examples from Southern France, *Geodinamica Acta*, 17/6, 27-38
- Bonillo J.-L. (dir), R. Borruey, J.-D. Espinas, A. Picon (1992) Marseille ville & port, Ouvrage, Éditions Parenthèses, Marseille, 221 p.
- 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. pp.246-247
- 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 pages
- Coulier Charles (1985) Hydrogéologie karstique de la Sainte Baume occidentale, Bouches du Rhône - Var, France. Thèse de doctorat de l'Université de Provence. 400 p.
- Cova R., Durozoy G. (1972) Carte hydrogéologique du département du Var. DDA - BRGM
- Durozoy G., Paloc H. (1969) Enseignements apportés par les expériences de colorations – Bassin du Beausset (Bouches-du-Rhône et Var). BRGM. Rapport 69 SGL 212 PRC. 29 pages
- Fournillon Arnaud (2012) Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (SE France). Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille. 425 pages
- Guieu G., Ricour J. et Rouire J. (2008) Découverte géologique de Marseille et de son environnement montagneux. Deuxième édition en collaboration avec J. Philip et R. Monteau. Ed. BRGM et Jeanne Laffitte, 244 p.
- Lismonde B., B. Arfib, C. Perret, L. Michel, M. Douchet, L. Potié (2011) Les débits de Port Miou (Cassis, France). 9th Conference on Limestone Hydrogeology, 1-3 Sept. 2011, Besançon, France
- Martin P., (1991) Hydromorphologie des géosystèmes karstiques des versants nord et ouest de la Saint Baume (Bouches-du-Rhône, Var). Etude hydrologique, hydrochimique et de la vulnérabilité à la pollution. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille II. 327 p.
- Meniscus X. (2012) Résurgence de Port Miou –223m le 7 mai 2012. cnps.plongeesouterraine.org, 8 pp. (consulté le 22/06/2012)

- Michel D. (1875) Eaux thermales et bains de mer du Roucas-Blanc, plage du Prado, Marseille. Impr. du "Journal de Marseille". 46 p.
<http://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb309417765>
- Monteau R. (1971) Le karst des formations turoniennes du bassin du Beausset (13 -83). DES Université Marseille II.
- Naud G. (1969) Etude hydrogéologique du bassin d'Aubagne à l'Est de l'Huveaune. DEA Université de Provence. 30 p.
- Rousset C., Jacq V. A., Magnan N. (1996) Reconstitution des conditions paléo-environnementales du dépôt du soufre oligocène des Camoins, à Marseille (Bouches-du-Rhône, France) ; rôle des bactéries dans la constitution et dans l'évolution des sédiments d'une lagune continentale aux eaux sulfatées. Bull. soc. Géol. France. t. 167, no 3, pp. 375-388
- SIH (Syndicat Intercommunal de l'Huveaune) 2013 Site internet <http://www.syndicat-huveaune.fr/> consulté en décembre 2012

PS 1 : Ce document est un extrait de la notice de la carte géologique Aubagne-Marseille 3^{ème} édition. Une erreur s'étant glissée malencontreusement dans la version originale du document, elle est ici corrigée : il s'agit de la date du traçage artificiel de Mauregard (tableau 1), il faut bien lire la date du 08/02/2011 pour l'injection à l'aven-perte de Mauregard.

PS 2 : Cette notice a été écrite en 2012-2013. Depuis, de nouvelles connaissances ont été acquises sur l'hydrogéologie régionale et en particulier sur les sources saumâtres de Port-Miou et Bestouan.