

Les débits de Port Miou (Cassis, France)

Baudouin Lismonde⁽¹⁾, Bruno Arfib⁽²⁾, Christian Perret⁽³⁾, Loïc Michel⁽⁴⁾, Marc Douchet⁽⁵⁾, Louis Potié⁽⁶⁾

- (1) baudouin.lismonde@wanadoo.fr. Association : Cassis, les Rivières Mystérieuses ; 28 rue de la Bajatière, 38100, Grenoble.
- (2) bruno.arfib@univ-provence.fr. Laboratoire de Géologie des Systèmes et des Réservoirs Carbonatés, Université de Provence, Case 67 - 3 Place Victor Hugo, 13003 Marseille- France ;
- (3) christian.perret@edf.fr. Association : Cassis, Rivières Mystérieuses ; DTG, EDF Grenoble.
- (4) lmichel@teledyne.com. Association : Cassis, Rivières Mystérieuses ; Teledyne RD Instruments Europe.
- (5) douchet.charlotte@wanadoo.fr
- (6) louispotie@aol.com. Association : Cassis, les Rivières Mystérieuses

Abstract :

The flow measurements of the important sub-marine spring, Port Miou (Cassis, France) are very difficult in reason of the density stratification and the great dimension of diving gallery. A test of 5 flow measurement methods is presented by the group of : Association Cassis, les Rivières Mystérieuses, Provence University, EDF and Teledyne enterprise, with the help of divers of FFESSM. Velocity measurements at the base of dam, water denivelation measurements at the dam, pressure difference at the dam, ultrasonic measurement of the velocity field in gallery (ADCP) and dilution measurement with uranine colorant (for the calibration of the others methods) are tested. The flow is 49 m³/s in flood and only 1.5 m³/s at the low water.

Résumé :

La mesure des débits de l'importante résurgence sous-marine de Port Miou (Cassis, 13, France) est rendue difficile par la stratification en densité des écoulements, la situation noyée et la dimension des conduits. Une étude regroupant des intervenants d'origines variées (Association Cassis, les Rivières Mystérieuses, Université de Provence, EDF, l'entreprise Teledyne RD Instrument et les plongeurs de la FFESSM) a permis de tester cinq méthodes au niveau du barrage souterrain construit pour un captage non réalisé : mesure de la vitesse dans une des buses du barrage (vélocimètre à Ultra-sons, ADCP), mesures de la dénivellation entre l'amont et l'aval et mesure de la différence de pression amont-aval au barrage, mesure du champ de vitesse dans la galerie (ADCP), mesure de la dilution d'un colorant injecté en amont (fluorescéine couplé à un fluorimètre GGUN FL). Les quatre premières méthodes demandent un tarage qui a été réalisé par la cinquième. On a ainsi pu déterminer la section de passage de l'eau au droit du barrage, la conductance hydraulique du barrage et la section de la galerie instrumentée avec l'ADCP. Les résultats des mesures et la réutilisation des données de CAVALERA (2007) montrent que les débits de cette source atteignent en grande crue 49 m³/s et à l'étiage descendent à 1,5 m³/s (d'eau douce) en moyenne journalière, sachant que le débit peut s'inverser à marée haute.

1. Introduction

La résurgence de Port Miou est une des plus importantes sources sous-marines de France. Le panache d'eau saumâtre qui en sort et qui vient impacter la surface de la mer est connu depuis l'antiquité. Plus récemment, les plongeurs ont exploré une énorme galerie noyée (de 5 à 18 m de largeur) sur plus de deux kilomètres qui s'enfonce en un gigantesque puits dont le fond n'a pas encore été atteint (-175 m).

L'intérêt économique d'une telle ressource potentielle en eau douce a stimulé des recherches dans les années 1970. La source est apparue saumâtre. Alors, la Société des Eaux de Marseille (SEM) a commandé la construction, au niveau d'une cloche, d'un barrage noyé avec déversoir aérien pour empêcher l'eau de mer de remonter par le fond de la galerie et de contaminer l'eau douce. Ce barrage a été construit 500 m en amont de la sortie de l'eau grâce au perçage d'un puits de 50 m et d'une galerie recoupant le conduit noyé. La réalisation du barrage a été difficile. Malheureusement, une contamination plus en amont a empêché cette opération de résoudre complètement le problème. L'eau reste saumâtre jusqu'à l'extrémité amont des conduits explorés (POTIE et al, 1973).

La mesure du débit est restée incertaine pendant de nombreuses années. Le débit des grandes crues avait été estimé dans les années 70 à une cinquantaine de mètres cube par seconde parce qu'à l'époque, le barrage était plus étanche que maintenant, une grande partie du débit de crue passait par le déversoir de crue du barrage dont la courbe de tarage est connue. En revanche dans sa thèse, Thomas CAVALERA (2007) a mesuré les vitesses dans les buses du barrage et a proposé des débits en multipliant les vitesses par la section des buses et en négligeant les fuites latérales du barrage. Mais ces fuites ne sont pas négligeables. On verra plus loin que cette approximation faussait les débits de 300 % environ. Les débits d'étiage de Port Miou étaient donc largement inconnus.

Nous présentons plusieurs essais menés en 2009 et 2010. Ils conduisent à une détermination de la surface totale de passage de l'eau à travers le barrage, et ouvrent donc la voie à des mesures en continu du débit de Port Miou. Tous ces essais ont été effectués à partir du barrage qui offre un accès commode au cours d'eau souterrain.

2. Différentes méthodes pour mesurer le débit

Cinq méthodes ont été utilisées pour mesurer le débit de Port Miou.

2.1. Mesure de la vitesse dans une buse du barrage

Le barrage est percé par un certain nombre de conduits (les buses) qui permettent le passage de l'eau sans une trop forte mise en charge. L'examen des conditions hydrauliques montre que les vitesses dans toutes les buses sont assez voisines, pour un débit donné. On peut donc installer un capteur de vitesse dans une buse et en déduire le débit de Port Miou, si on connaît la surface totale de passage de l'eau.

C'est la méthode qu'a adoptée Thomas CAVALERA (2007). Il a installé pendant toute une campagne de mesures (2005-2006) un vélocimètre à ultrasons. Les vitesses qu'il a mesurées se situent entre 0,2 à 6 m/s. Mais il reste la question de la surface totale de passage.

Cette méthode de détermination des débits nécessite un seul tarage qui fournira la section équivalente totale de passage de l'eau. Ce tarage n'a été fait qu'en 2010.

L'objection évidente à cette méthode est qu'il existe des fuites latérales au barrage, et on peut craindre que la surface des fuites n'augmente avec le débit du fait de la mise en charge qui peut atteindre 3,5 m en amont du barrage.

Cette méthode a été testée de nouveau en 2011 avec l'ADCP de Teledyne RD (voir plus loin).

2.2. Mesure de la perte de charge au droit du barrage

Le conduit de Port Miou est énorme, l'eau circule donc facilement sans quasiment de perte de charge, sauf au niveau du barrage où la diminution très forte de la section engendre une perte de charge. Pour un débit donné, il existe donc une dénivellation des surfaces libres entre l'amont et l'aval du barrage. Si on connaissait la conductance hydraulique du barrage (ou sa section de passage), on pourrait calculer le débit à partir de la mesure de la dénivellation. On retombe sur le problème de la méthode précédente. Cette méthode nécessite aussi un seul tarage.

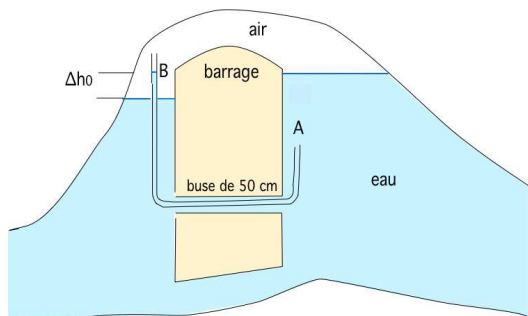


Fig. 1- Le niveau à eau du barrage de Port Miou

Pour déterminer cette dénivellation, des essais préliminaires ont été entrepris par l'Association *Cassis, les Rivières Mystérieuses* à l'aide d'un simple tuyau dont une des branches trempait dans le plan d'eau en amont et dont l'autre venait affleurer la surface libre du plan d'eau en aval. Un plongeur à la surface de l'eau mesurait la dénivellation entre l'eau dans le tuyau et l'eau du plan d'eau. Les premiers essais ont montré que les dénivellations étaient de l'ordre de quelques centimètres pour des débits moyens.

Mais l'inconfort de la mesure (opérateur dans l'eau) nous a conduit à modifier le niveau à eau en créant un vide partiel du côté de l'opérateur. Les deux niveaux remontent de la même valeur, ce qui fait que la dénivellation représente la perte de charge du barrage. Des calculs ont été faits pour corriger les hauteurs d'eau de l'influence des

variations possibles de salinité entre les deux plans d'eau (mesurés par l'Université de Provence).

La question qui reste posée et à laquelle l'ADCP (au paragraphe suivant) permettra de répondre est la suivante : est-ce que la mesure de la perte de charge permettra d'obtenir le débit qui transite ? La réponse n'est pas évidente. En effet, l'existence de fuites latérales au barrage nous fait suspecter que la surface de passage de l'eau peut augmenter quand le débit augmente. Même si la loi de perte de charge pour une buse individuelle est quadratique (LENCASTRE, 1995), on peut craindre que pour tout le barrage l'exposant sur le débit soit plus petit que 2, suite à cet effet des fuites croissantes.

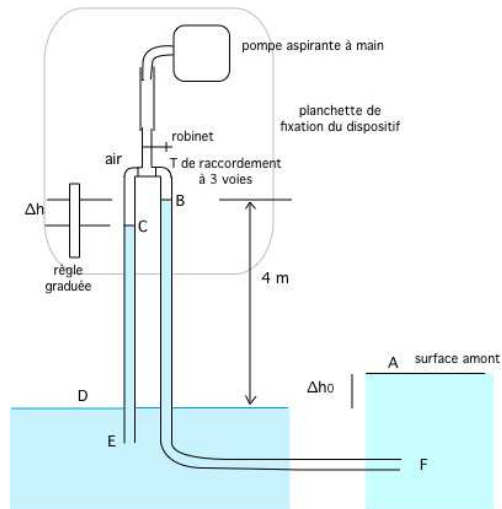


Fig. 2- Déport vers le haut des surfaces libres du niveau à eau grâce à une simple pompe à vide manuelle

2.3. Mesures des pressions en amont et en aval du barrage

On peut mesurer aussi la perte de charge au moyen de deux capteurs de pression. C'est ce que fait l'équipe de l'Université de Provence (programme KarstEau de Bruno Arfib). Mais la mesure nécessite de faire la différence de deux signaux voisins, ce qui rend la mesure très sensible à des dérives possibles des capteurs. Il faut donc contrer les dérives temporelles des capteurs par des calages réguliers fournis par la méthode visuelle au niveau à eau. On verra plus loin que ces calages ne sont faciles qu'en l'absence de houle et de bateaux à moteur dans la calanque de Port Miou.

Mais on retombe sur le problème vu plus haut pour passer d'une chute de pression à un débit : quelle est la conductance globale du barrage ?

2.4. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Il existe des appareils sophistiqués et coûteux, ADCP, qui émettent dans plusieurs directions des trains d'ondes d'ultrasons. Le transducteur sert aussi de récepteur et les particules présentes naturellement dans l'eau renvoient une faible partie de l'onde. La mesure du temps de retour fournit la position de la particule et la mesure du décalage Doppler fournit la vitesse de la particule.

L'existence de plusieurs faisceaux d'onde permet à chaque instant de reconstituer la carte des vitesses dans la veine liquide. Le débit s'obtient par intégration des vitesses sur l'ensemble de la surface de passage.

Là encore, on constate qu'il faut connaître la surface totale de passage, ce qui n'est pas évident dans un conduit complexe comme celui de Port Miou. L'appareil peut

fonctionner n'importe où, mais la mécanique des fluides enseigne que le champ de vitesse sera plus homogène au niveau d'un rétrécissement que dans un élargissement.

L'entreprise Teledyne RD Instrument dont le directeur Loïc Michel appartient à l'Association *Cassis, les Rivières Mystérieuse*, a aimablement prêté un appareil qui a été installé à 80 m en amont du barrage au plancher de la grande galerie.

Les essais ont été conduits en plusieurs campagnes dont celle de décembre 2008 qui a mesuré une crue décennale. L'analyse des signaux ajoutée à la mesure de la pression a permis de montrer que :

- la perte de charge dans le barrage suit une loi quadratique (turbulent), ce que nous détaillons plus loin.
- le profil de vitesse n'est pas uniforme dans la section choisie
- la détermination de la surface de passage de l'eau est très difficile du fait des virages du conduit noyé.

On en déduit que, pour conduire au débit, cette méthode nécessite un tarage pour connaître la section de passage. Mais il reste à valider l'hypothèse que le profil de vitesse reste affine (semblable au sens géométrique du terme) quelque soit le débit. La mécanique des fluides laisse penser que cette hypothèse n'est pas vérifiée (conduit trop peu rectiligne).

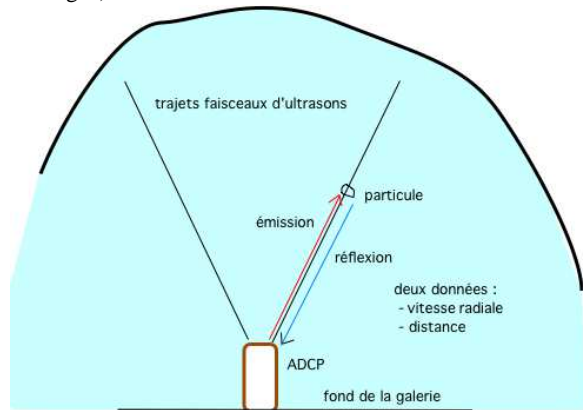


Fig. 3- Principe de la mesure de débit par ADCP

On aurait pu aussi imaginer disposer une batterie de vélocimètres dans une galerie sur un maillage de fils préinstallés, mais ce dispositif serait beaucoup plus lourd à mettre en œuvre qu'un ADCP. Nous avons donc renoncé.

Détermination expérimentale de l'exposant de la loi de perte de charge. Lors de la campagne de mesure de décembre 2008, les mesures faites par l'ADCP (vitesse, pression) ont permis de démontrer que la perte de charge au droit du barrage obéit à une loi quadratique. Il était évident que la perte de charge dans une buse donnée du barrage variait comme le carré du débit (régime turbulent), mais il n'était pas évident que les mises en charge ne mettaient pas en service des fuites qui modifieraient l'exposant de la loi globale. Si des fuites existaient, situées plus haut que le niveau d'étiage, alors la surface de passage de l'eau augmenterait avec le débit et l'exposant du débit pour la perte de charge serait globalement plus petit que 2.

Pour déterminer la perte de charge, nous disposions du niveau de l'eau à l'amont du barrage et nous avons utilisé les tables de la marée à Marseille, aimablement communiquées par la SONEL (Système d'observation du niveau des eaux littorales, que nous remercions ici) pour obtenir par différence la perte de charge. Les points utilisés

correspondent à une grande crue, peut-être décennale. Sur la Figure 4, en coordonnées logarithmiques, la montée du débit correspond aux points peu nombreux en dehors de la droite. L'erreur provient que la tempête liée à l'épisode pluvieux a engendré des vents dont nous n'avons pas pu tenir compte. La décrue, au contraire, correspond à une période plus calme où les valeurs des marées ne sont pas trop perturbées par le vent. On constate que les points correspondant à la décrue se disposent régulièrement sur une droite de pente deux, ce qui démontre la relation quadratique recherchée. Cette relation est vérifiée pour la plage des débits s'étendant de 10 à 40 m³/s. Au-delà de 40 m³/s, la relation quadratique n'est plus vérifiée (LISMONDE et al, 2010). Mais on sait bien pourquoi : c'est à partir de ce débit que le barrage de Port Miou se met à déverser, modifiant complètement la loi de perte de charge.

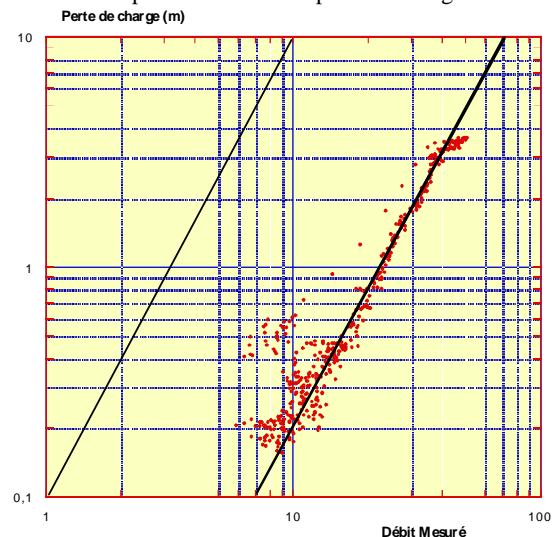


Fig. 4- On a reporté en coordonnées logarithmiques le débit en abscisse et la perte de charge en ordonnée. Sur une plage des débits qui s'étend de 10 m³/s à 40 m³/s, la relation est bien quadratique

Ainsi, cette campagne de mesure avec l'ADCP a permis de démontrer que la perte de charge au droit du barrage pourra conduire à la détermination du débit par une loi quadratique.



Photo 1 - Préparation de l'ADCP sur le barrage de Port Miou, avec Loïc Michel à gauche (ph. BL)

2.5. Mesure ponctuelle du débit d'un cours d'eau par injection d'un traceur (méthode de dilution)

Une méthode classique de mesure du débit d'un cours d'eau consiste à injecter en amont une certaine quantité d'un traceur (sel de table, fluorescéine, etc) dont on sait mesurer la concentration (ANDRE, 1960). Si la turbulence dans le cours d'eau est suffisante pour assurer un mélange avec le reste de l'eau, et donc si on peut admettre que, dans une section donnée, la concentration en traceur est uniforme à un instant donné, alors une simple intégration temporelle de la concentration au point de mesure suffit pour déterminer le débit.

On remarque que cette méthode permet seulement de mesurer un débit à un instant donné. Elle sert en général à construire la courbe de tarage d'un cours d'eau.

Cette méthode semblait très intéressante pour caler justement les autres méthodes vues au-dessus.



Photo 2- Étalonnage du fluorimètre GGUN d'EDF à Port Mioupar C. Perret (ph. BL)

Mais il y a de grandes interrogations sur sa validité dans le cas de Port Miou. L'hypothèse la plus contestable reste celle de l'homogénéité de la concentration dans la section de mesure à un instant donné (hypothèse dite du bon mélange). Des mesures anciennes ont montré que l'écoulement est stratifié en densité du fait de la présence d'eau saumâtre (plus dense). On sait que la stratification est un obstacle à la diffusion turbulente (VIOLETT, 1997). On peut supposer que la méthode de dilution doit être d'autant plus juste que le débit est plus grand car les vitesses augmentant, le brassage est plus efficace. Heureusement, le hasard a fait que lors des deux essais, le débit était assez important (6 à 7 m³/s) ce qui a favorisé le mélange. Pour vérifier l'hypothèse de bon mélange, il aurait fallu contrôler dans plusieurs buses l'égalité de la concentration à chaque instant, mais cela n'a pas été fait, faute de moyens.

3. Le tarage de toutes les méthodes

Les quatre premières méthodes de mesure du débit ont été tarées par la méthode de dilution.

Deux essais ont eu lieu, le premier le 24 octobre 2009 et le deuxième le 30 mai 2010. La pratique de la première expérience a permis d'améliorer la précision de la deuxième. À chaque fois, une petite quantité de 100 g de fluorescéine a été injectée 250 m en amont du barrage par un plongeur (Marc Douchet). La mesure de concentration était assurée par un fluorimètre GGUN FL placé à demeure

par l'Université de Provence en amont du barrage. Un fluorimètre analogue prêté par EDF contrôlait l'opération.

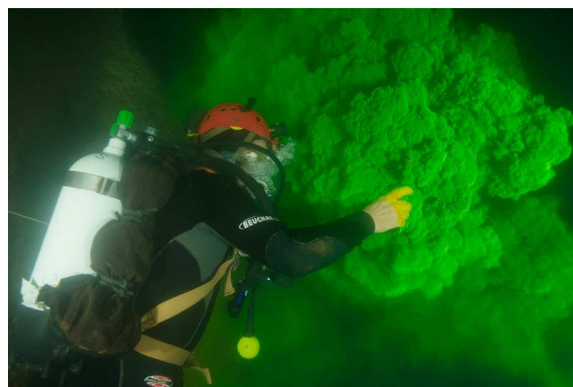


Photo 3- L'injection de fluorescéine en amont dans le siphon, (ph. Hervé Chauvez)

On a pu, à l'issue des deux campagnes (PERRET et al, 2009 et ARFIB et al, 2010), fournir les constantes d'étalonnage des quatre méthodes :

Mesure des débits par les vitesses : la surface équivalente de passage dans le barrage (obtenue comme le rapport entre le débit et la vitesse dans une buse) vaut $S = 6,45 \text{ m}^2$ (avec les valeurs des coefficients de perte de charge adoptés par Cavalera). Cavalera, pour sa part, avait retenu une section de passage totale $S = 1,95 \text{ m}^2$.

Mesures des débits par la perte de charge au barrage. On a trouvé, k , la conductance hydraulique du barrage, c'est-à-dire le rapport entre le débit et la racine carrée de la perte de charge (exprimée en mètre d'eau saumâtre) :

$$Q = k\sqrt{\Delta h} \quad \text{avec } k = 22,9 \text{ m}^{5/2} \text{ s}^{-1}$$

Dans cette relation, le débit est exprimé en m³/s et la dénivellation des surfaces libres est exprimée en m. Des formules plus précises ont été établies qui permettent de tenir compte de la salinité de l'eau, mais ne modifient pas sensiblement les résultats. Cette formule n'est valable que pour une période pendant laquelle les fuites du barrage sont restées identiques à celles en 2010. Elle ne permet pas de remonter à des mesures faites juste après la construction du barrage car le barrage était plus étanche au début.

Par exemple, la fermeture des vannes le 10 janvier 1978, s'est accompagnée d'une perte de charge de 3,5 m alors que la perte de charge avant fermeture était de l'ordre de 0,1 m (POTIE, inédit). Ce rapport de 36 entraîne un rapport des sections de 6, ce qui veut dire que la surface des fuites était en 1978 de l'ordre de $1/(6-1) = 20\%$ de la surface des buses. De nos jours, ce rapport est plutôt de 230%, dix fois plus grand donc. On en déduit que chaque grande crue peut être l'occasion d'une variation de la surface des fuites et donc du tarage du barrage. Il est donc nécessaire, de loin en loin, de refaire l'étalonnage du barrage par une mesure à la fluorescéine.

La même relation permet de tarer la mesure par capteurs de pression.

Mesures des débits par ADCP. On a pu déterminer au cours du tarage la section équivalente au droit de l'ADCP. On a trouvé $S = 110 \text{ m}^2$. Malheureusement, la section choisie n'était pas très heureuse (élargissement) et un nouvel emplacement a été retenu plus récemment (2011) qui devra faire l'objet d'un nouveau tarage pour connaître la section de passage de l'eau. En revanche, le tarage a permis

de connaître la valeur du débit maximum pour la grande crue de décembre 2008 : 49 m³/s.



Photo 4- Marc Douchet de retour de plongée sur le barrage de Port Miou (on reconnaît Claude Touloumdjian) (ph. BL)

Différentes valeurs des débits de Port Miou

Ce tarage du barrage permet de trouver la section actuelle de passage de l'eau et permet donc d'obtenir les débits à partir des mesures pas trop anciennes de vitesses dans les buses (thèse CAVALERA, 2007). En particulier, il permet de donner le facteur de correction pour les débits estimés par Cavalera. Tous les débits sont à multiplier par le facteur 3,30. Ce facteur de correction constant suppose que les surfaces de fuite sont situées au-dessous des niveaux d'étiage de l'eau. Cela semble confirmé par les plongeurs et par les mesures faites avec l'ADCP (voir plus haut).

Grands débits. Le 15 décembre 2008, la crue a atteint 49 m³/s. Le débit a été déterminé à partir des vitesses mesurées avec un ADCP prêté par l'entreprise Télédyne, et placé à 80 m en amont du barrage. La salinité était négligeable (mesurée par l'Université de Provence). Il y a eu débordement sur le barrage au maximum de 40 cm (calcul et calage à partir des observations de B. Arfib). On a tenu compte de l'écoulement libre au-dessus du déversoir en utilisant la courbe de tarage établie par Coyne & Bellier (CAVALERA, 2007).

La plus grande crue observée par Cavalera a eu lieu le 30 janvier 2006 et a atteint un débit de 39 m³/s. Cette dernière crue a été la plus grande sur presque deux ans.

Petits débits. Les petits débits se calculent grâce aux mesures de vitesses dans une buse du barrage (CAVALERA, 2007). Pendant sa campagne de mesure, les plus petits débits ont eu lieu pendant l'étiage d'août 2006. On trouve ainsi que les débits à marée haute vers le 15 août 2006 sont descendus à 1,3 m³/s. Il s'agit du débit total d'eau saumâtre. La salinité atteignait 14 g/l, c'est-à-dire qu'en considérant la salinité de la mer de 35 g/l, cela représentait un débit d'eau douce de 1,3 (35-14)/35 = 0,8 m³/s.

On peut imaginer qu'un étiage associé à une grande marée (ou une tempête) puisse conduire à un débit total nul ou négatif, mais cela ne pourra durer que quelques heures et le débit redeviendra positif très vite.

Cet effet des marées est très important puisque pendant l'étiage d'août 2006, les marées basses voyaient sortir un débit de 4,5 m³/s alors que les marées hautes le ramenaient à

1,3 m³/s. Le débit moyen journalier ne semble pas pouvoir descendre en dessous de 2,5 m³/s, soit 1,5 m³/s d'eau douce.

Conclusions pour les débits de Port Miou : pour ce qui concerne la campagne de Thomas Cavalera et la mesure de décembre 2008, on voit que les débits totaux ont varié entre 1,3 et 49 m³/s et que les débits d'eau douce ont varié entre 0,8 et 49 m³/s.



Photo 5- L'équipe du 24 octobre 2009 sur le barrage à la fin des essais. On reconnaît Louis Potié à droite (ph. BL)

4. Mesure du débit en continu : rôle des perturbations

On pourrait penser que le problème est résolu et qu'il n'y aura pas de difficulté à suivre le débit dans le temps, mais ce serait oublier une circonstance particulière à ce cours d'eau : il est en relation avec la mer. D'où des perturbations prévisibles.

Rôle des vagues. Il y a d'abord les vagues occasionnées par le passage des bateaux dans la calanque de Port Miou très fréquentée et qui se répercutent sur le niveau du plan d'eau aval et donc sur le débit qui fluctue au passage de la perturbation (LISMONDE, 2011).

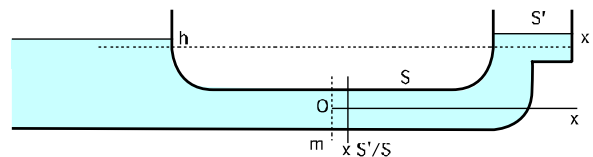


Fig.4- Schéma simplifié du siphon entre la mer et le barrage pour le calcul du mouvement pendulaire de l'eau du siphon excité par la houle à gauche

Ces vagues ont des fréquences du même ordre que celles de la houle. Elles correspondent à une excitation du siphon, situé en aval du barrage, à une période de l'ordre de 10 s (fréquence de l'ordre de 0,1 Hz). Une analyse simplifiée de la masse d'eau excitée mécaniquement met en évidence une période propre pour la résonance pendulaire, dont l'ordre de grandeur est:

$$T = \pi \sqrt{\frac{2L}{g}} = \pi \sqrt{\frac{2 \cdot 600}{10}} = 34 \text{ s}$$

On voit que la période d'excitation est nettement plus petite que la période propre du siphon.

Pour une excitation de hauteur h_0 , la réponse côté aval du barrage a pour forme (on a négligé les frottements visqueux, très faibles à Port Miou, vues les dimensions) :

$$x_0 = \frac{\omega_0^2}{|\omega^2 - \omega_0^2|} h_0$$

Dans cette relation, x_0 est l'amplitude des oscillations au barrage (aval) en régime sinusoïdal correspondant à l'excitation supposée sinusoïdale d'amplitude h_0 , et \square est la pulsation d'excitation. Pour une excitation de période $T = 10$ s, on trouve que le gain est voisin de 1. L'oscillation se conserve à peu près en hauteur. On en conclut : le siphon en aval du barrage de Port Miou transmet à peu près les variations du niveau de la mer dues à des perturbations comme la houle.

On montre aussi que la présence des buses qui traversent le barrage, et permettent au débit de passer, induit un amortissement à ces fluctuations rapides et leurs amplitudes s'en trouvent réduites dans un facteur de 4 à 6.

Rôle des marées. Il y a enfin les marées qui imposent des variations lentes des niveaux. Les marées se répercutent exactement sur le niveau en aval du barrage. Mais le niveau en amont du barrage va réagir avec un certain déphasage. En effet, nous disposons de deux temps, l'un qui est le temps propre de la marée semi-diurne, T , le temps lié à l'excitation, et l'autre qui est un temps propre au système hydraulique constitué par l'amont du siphon inconnu de Port Miou (point A, Fig. 5). Ce temps, T' , est celui du remplissage du volume V obtenu par le produit de la hauteur de la marée et l'aire de la surface libre, S_{am} . Le débit en amont permet de remplir ce volume en un certain temps T' , qui est le rapport du volume V sur le débit.

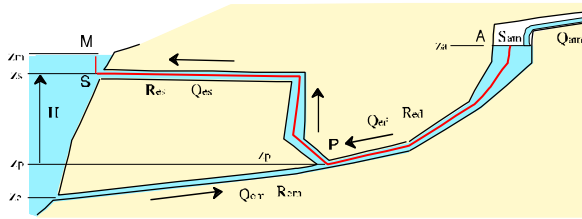


Fig. 5- Schéma montrant le volume engendré par la fluctuation de l'altitude du point A : $V = S_{am} \Delta z_A$.

Ce schéma correspond à une hypothèse incertaine de la relation de Port Miou avec la mer, il n'a donc qu'une valeur indicative.

En examinant les données publiées par ARFIB et al. (2006) on constate (en corrigeant les débits d'un facteur 3,3) que la fluctuation sur le débit atteint $1 \text{ m}^3/\text{s}$ et qu'elle ne dépend guère du débit. Cette fluctuation importante montre que le temps de remplissage du volume amont est significatif par rapport au temps propre de la marée. Si on adoptait l'hypothèse présentée dans la communication LISMONDE (2011) de ce même colloque (voir Fig. 5), on arriverait à une surface de l'ordre d'un hectare. Mais il n'est pas évident que Port Miou réponde à ce schéma.

Fréquence d'acquisition des mesures de débit. Tous ces phénomènes : vagues de sillage, houles, marées et perturbations orageuses font que le débit de Port Miou oscille sans cesse. Une acquisition des signaux avec une fréquence suffisante (1 Hz) est donc nécessaire. Quand on disposera de chroniques suivies des débits, il sera possible par analyse du signal de retrouver toutes les perturbations indiquées. Le débit moyen journaliers ne pourra être obtenu que par une moyenne sur un grand nombre de valeurs. On voit par là que le débit de Port Miou reste peu commode à mesurer.

5. Conclusions

Les débits de Port Miou varient d'une manière complexe. D'une part, parce que les conditions

d'alimentation du siphon changent au cours du temps pour des raisons hydrologiques (pluie, fonction de transfert du karst) et d'autre part, parce que les conditions aux limites à la sortie de l'émergence changent : vagues, houle, marée.

Nous avons démontré, grâce à un ADCP, que la mesure de la perte de charge conduisait d'une manière simple à la détermination des débits (loi quadratique), de même que la mesure de la vitesse dans une des buses du barrage conduit au débit grâce à la détermination par tarage à la fluorescéine.

Il resterait à tester soigneusement que la stratification en densité ne perturbe pas la mesure du débit par dilution de colorant.

Mais seules, des chroniques suivies de mesures (vitesse dans une buse et perte de charge) permettront d'améliorer la connaissance de cette rivière souterraine magnifique.

Remerciements : L'étude que nous présentons succinctement est issue de la collaboration amicale de :

- l'Association : Cassis, les Rivières Mystérieuses, qui s'intéresse aux sources de Port Miou et Bestouan (Louis Potié, Christian Perret, Loïc Michel, Marc Douchet, Baudouin Lismonde, ...),
- l'Université de Provence (Bruno Arfib, Thomas Cavalera),
- l'entreprise Teledyne RD Instrument (Loïc Michel),
- l'entreprise EDF (DTG Grenoble : Christian Perret, Jean-Michel Cravero).

Nous remercions également les plongeurs de la FFESSM (Marc Douchet, Marc Renaud, Michel Guis, Hervé Chauvez, Michel Bolagno ...) sans qui rien ne serait possible.

Références

- ANDRE H. 1960. Méthode chimique de dilution. Procédé par intégration. Mémoires et travaux de la SHF décembre 1960.
- ARFIB B., CAVALERA T., GILLI É. 2006. Influence de l'hydrodynamique sur l'intrusion saline en aquifère karstique côtier. Comptes-rendus à l'Académie des Sciences, Geosciences, 338, 757-767.
- ARFIB B., LISMONDE B., DOUCHET M. 2010. Rapport interne, 9 p. Site internet : « rivièresmystérieuses.org ».
- CAVALERA T. 2007. Étude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritère. Thèse de doctorat à l'Université de Provence (se reporter à cette thèse pour trouver d'autres références).
- LENCASTRE A. 1995. Hydraulique générale. Eyrolles Safège, 633 p.
- LISMONDE B., MICHEL L., DOUCHET M. 2010. Rapport interne. Site internet : « rivièresmystérieuses.org ».
- LISMONDE B. 2011. Rapport interne, 12 p.
- PERRET C., ARFIB B., DOUCHET M., LISMONDE B., MICHEL L., POTIE L. 2009. Rapport interne. Site internet : « rivièresmystérieuses.org ».
- POTIE L., RICOUR J. 1973. Études et captage de résurgences d'eau douce sous-marines. Revue technique internationale de l'eau, p 5-18.
- SONEL : <http://www.sonel.org/>
- VIOLLET P.-L. 1997. Mécanique des fluides à masse volumique variable. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 242 p.