

Mesures de débit dans les réseaux karstiques noyés et pénétrables - Différentes approches testées – difficultés et échecs - Quelles précisions en attendre

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

(1) EDF DTG - christian.perret@edf.fr, (2) baudouin.lismonde@wanadoo.fr, (3)
TélédyneRdInstrument, lmiche@teledyne.com, (4) louispotie@aol.com,
(5) Aix-Marseille Université, arfib@cerege.fr

Résumé

L'Association "Cassis Mystérieuse" a repris, sous l'impulsion de la Ville de Cassis, les études du Syndicat de Recherches de Port-Miou, ci après désigné par "SRPM" (BRGM, Coyne et Bellier, SEM), menées de 1968 à 1980, sur les rivières souterraines de Cassis, avec **une priorité donnée à la mesure de débit d'étiage**, préalable à toute exploitation quelle qu'en soit l'usage. Par ailleurs des Universitaires de Marseille ont repris la question avec une thèse (Cavalera-2007) et dans le cadre du programme "Karsteau" (Université de Provence).

Avant l'obturation totale de la galerie, entre 1972 et 1976, il n'était pas possible d'annoncer des débits précis, tout au plus des estimations, en période d'étiage prononcé où les vitesses du courant pouvaient être de l'ordre du mm/s dans une galerie de plus de 200 m² de section. Toutes les tentatives de quantification des débits en période d'étiage n'avaient abouti jusqu'alors qu'à une estimation relative des apports. Ainsi on estimait en 1973 les débits d'étiage entre 2 et 3 m³/s, estimation peut être très trompeuse liée au type de galerie où ont été mesurées depuis les débits des vitesses très faibles à l'étiage et à une stratification liée aux variations de salinité et de température, autant d'éléments qui justifient que l'on relativise les données de vélocimétrie qu'il faudrait multiplier sur une même section de galerie.

La construction d'une chronique des apports en eau douce de la source de Port Miou reste pourtant un objectif majeur qui contribuerait à l'amélioration des connaissances des systèmes karstiques sous marin. Suivant l'objectif recherché - exploitation ou simple bilan - l'utilité de connaître les débits d'étiage n'est pas la même ! Capitale pour un projet d'exploitation, elle peut apparaître secondaire pour l'estimation d'un débit moyen. L'association s'est normalement trouvée confrontée à ce double objectif. Elle a arrêté un protocole de mesures avec pour objectif l'exploitation éventuelle de la ressource. Lors deux campagnes de mesure menées en 2009 et en 2010, la faisabilité de mesurer ponctuellement le débit de la galerie a été démontrée en utilisant la méthode de jaugeage par dilution d'un traceur fluorescent. Ces mesures ont pu être rattachées à la différence de niveau observée de part et d'autre du barrage qui avait construit dans les années soixante dix. Ces éléments permettent aujourd'hui d'envisager de manière sérieuse la construction d'une série chronologique de débit, seule élément qui permettrait de quantifier de manière tangible les apports de cet aquifère.

1. Introduction

1.1. Méthodes de mesures et équipements

Alors que le XXIème siècle est maintenant bien engagé, aucune technique ne permet encore de mesurer en continu le débit d'une rivière quelle soit aérienne ou souterraine et pour construire des chroniques d'apports, l'hydromètre doit avoir recours à des techniques indirectes qui consistent à mesurer un ou plusieurs paramètres représentatifs du débit. Une loi d'étalonnage ou de tarage qui relie le débit avec le paramètre de contrôle doit être construite à partir de mesures de débit appelées couramment jaugeages. Dans le cas particulier de Port Miou avec un conduit aux dimensions exceptionnelles et aux formes hétérogènes, l'application des techniques traditionnelles ne va pas sans poser de nombreux problèmes. Les références dans la littérature étaient rares. Il est apparu après de nombreuses réflexions que quatre méthodes de contrôle du débit pouvaient être appliquées. Deux sont basées sur des mesures de vitesses :

La mesure d'un profil de vitesses au travers d'une section de la galerie à l'aide d'un équipement type "ADCP" (Acoustic Doppler Current Profiler) habituellement utilisé en océanographie était susceptible de produire des valeurs de débit.

La mesure de vitesses dans un opercule calibré (buse) au travers d'un barrage existant pouvait paraître évidente mais présentait l'inconvénient de ne pas prendre en compte les pertes de contournement importantes de ce barrage sans fondations.

Deux reposent sur des mesures de pressions :

La mesure de la de la différence des lignes piézométriques entre deux sections du conduit.

La mesure de la différence de pression "amont-aval" du barrage, pouvait être expérimentée.

Dans tous les cas, la détermination du débit ne peut se faire que par une loi d'étalonnage (de tarage) établie à partir de mesures de débit que l'on appelle couramment jaugeages dans le jargon de l'hydrométrie. Il est apparu que la méthode la plus adaptée était celle basée sur la conservation de la masse qui consiste à mesurer le facteur de dilution d'un traceur fluorescent dans l'écoulement.

1.2. Les mesures directes de débit ou jaugeages

La mesure directe du débit peut être envisagée selon deux familles de méthodes : l'exploration du champ des vitesses et la dilution d'un traceur dans l'écoulement ce qui revient à la mesure d'un volume sur un temps.

1.2.1. Exploration du champ des vitesses

L'expression la plus évidente du débit qui transite dans un conduit en charge est donnée par :

$$Q = V_m \cdot S \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (1)$$

où V_m = vitesse moyenne de l'écoulement en m/s et S = section de passage de l'écoulement en m^2 .

L'exploration du champ des vitesses consiste à mesurer la répartition des vitesses sur une même section de galerie et d'en tirer une "vitesse moyenne". L'opération, simple en apparence se complique sérieusement lorsqu'il faut réaliser ces mesures dans des galeries où les sections peuvent être importantes (100 à 200 m^2 ou plus), la géométrie hétérogène, les vitesses faibles à très faibles et où des phénomènes de stratification (salinité, t° ...) ont été observés ! De plus une stratification en densité, liée aux variations de salinité et de température observée avant et après barrage entraîne des difficultés d'interprétation ou de généralisation. "Si l'inhibition de la diffusion turbulente et peut empêcher l'effacement des hétérogénéités, et maintenir la stratification, pour la salinité et la température, ce n'est pas vrai pour la vitesse pour laquelle il existe des mécanismes spécifiques de transfert". Ces notions sont valables pour le conduit de Port Miou. De plus, la taille de la galerie conduisait à estimer que les vitesses à mesurer lors des séquences d'étiage seraient très faibles, probablement de l'ordre du cm/s. Dans ces conditions, il paraissait inenvisageable de réaliser une exploration du champ de vitesses que ce soit de manière fixe ou mobile avec l'aide d'un plongeur par exemple.

1.2.2. Mesure instantanée de débit par dilution d'un traceur fluorescent

Une première mesure de débit par dilution a été effectuée (24 10-09) dans la résurgence de Port Miou

Cette méthode repose sur un principe de base de la physique : la conservation de la masse. Ces dernières années, il semble que seules les équipes d'Électricité de France la pratiquaient encore de manière courante et systématique pour l'étalonnage de leurs stations d'hydrométrie situées dans les zones de montagne. Aujourd'hui, grâce à un nouveau fluorimètre immergeable développé à Neuchâtel par Pierre Schnegg, la méthode est en voie de simplification car utilisable sans difficulté dans sa version dite « globale » : le traceur est injecté en une seule fois dans la rivière et on mesure l'évolution de la concentration en produit à la distance du « bon mélange ». L'expression du débit est donnée par :

$$Q = \frac{V_i \cdot C_0}{\int_0^T D \cdot C_0 dt} = \frac{V_i}{\bar{D} \cdot T} \quad (2)$$

où v_i représente le volume de traceur injectée ($v_i = 454$ ml), T est le temps de passage du traceur et D le facteur de dilution du traceur.

deux fluorimètres ggun-fl ont été utilisés : celui d'edf dtg et celui de l'université de marseille. le volume v_i a été injecté dans la rivière par les plongeurs à une distance estimée de 150 mètres environ en amont du barrage.



Fig. 1 : Injection de la fluorescéine par les plongeurs

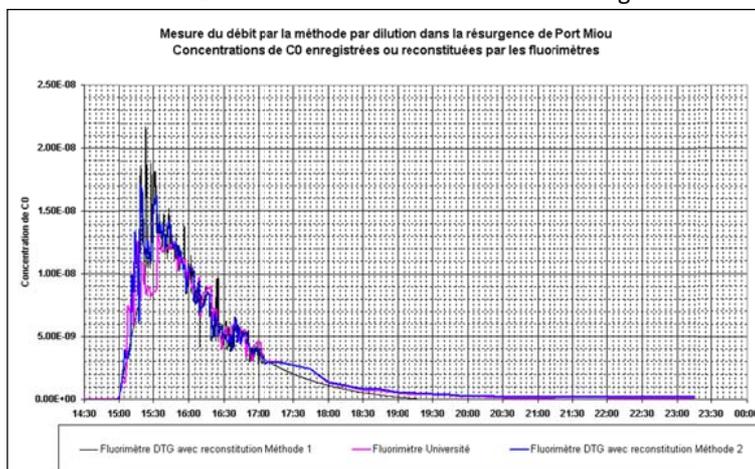


Fig. 2 : Évolution de la concentration de fluorescéine au niveau du barrage

On constate la bonne co-variation des signaux enregistrés par les deux appareils ce qui permet de supposer que la condition de bon mélange était respectée.

Le dépouillement des deux signaux a permis de faire une évaluation du débit qui transitait ce jour là dans la galerie de Port Miou selon l'équation (2). Dans ces conditions, on a proposé la valeur de 6 m³/s comme débit qui transitait dans la source de Port Miou entre 14h30 et 20h00 le 24 octobre 2009. On rappelle que cette valeur correspond à un apport d'eau saumâtre et qu'il conviendra de la corriger avec la valeur de la salinité mesurée pour en déduire l'apport en eau. L'opération de mesure du débit transitant dans la résurgence de Port Miou a été considérée comme globalement satisfaisante. La méthode de mesure du débit par dilution « globale » du traceur Fluorescéine s'avère efficace. Elle a été rendue possible grâce à l'intervention des plongeurs et à la mise en œuvre de deux fluorimètres type GGUN-FL, l'un exploité par l'Université de Provence, l'autre par EDF DTG.

Par conséquent, on peut retenir que cette opération a permis de mesurer de manière absolue le débit global qui transitait ce jour là dans la résurgence. La méthode pourrait par conséquent, être répétée pour des régimes de débits différents de manière à définir une loi d'étalonnage au(x) contrôle(s) de débit qui seront mis en place. Le volume initial V_i devra être adapté au débit estimé.

Cette technique, précise en condition optimales, suppose néanmoins que certaines conditions soient réunies : une dilution parfaitement homogène au point de détection et l'absence de fuite ou d'apport entre le point d'injection et le point de détection du composant. D'autre part, cette technique ne donne qu'un débit ponctuel et l'opération doit être répétée à chaque mesure. A noter que l'équipe B. Lismonde B. Arfib a répété l'opération avec succès en mai 2010 avec l'aide d'une équipe de plongeurs.

2. Les contrôles de débit

2.1. Mesure de la pression différentielle entre deux points de l'écoulement

B. Lismonde avait proposé pour une mesure du débit dans un conduit karstique, une méthode peu coûteuse nécessitant seulement un manomètre enregistreur et un tuyau souple.

Le site choisie : une galerie de section variable, comme la galerie noyée du Bestouan Cassis), remplie d'un liquide homogène (mais de salinité variable dans le temps), et supposée sans stratifications de salinité, t°....

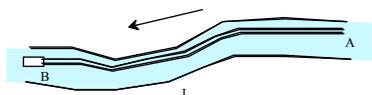


Figure 3

Le théorème de Bernoulli appliqué sur une ligne de courant permet de déduire une relation entre la différence de pression entre deux points A et B et le débit :

$$(3)$$

Si les pertes de charge entre A et B sont négligées, le coefficient K peut être calculé à partir des géométries des sections de passage en A et en B. Dans les cas pratiques et en particulier à Port Miou, on fait le constat que K doit être déterminé empiriquement à partir de mesures d'étalonnage.

2.2. Mesure de pression différentielle de part et d'autre du barrage

2.2.1. Principes et premiers résultats

Un niveau d'eau mesure la dénivellation entre la surface libre en amont et la surface libre en aval du barrage. Cette dénivellation est liée à la perte de charge de l'eau au passage du barrage, l'eau circulant dans des buses traversant le barrage et par les fuites dans l'environnement du barrage. On notera que l'équation (3) établie précédemment reste applicable à ce cas de figure.

L'installation a été réalisée par les plongeurs dont on a compris le rôle déterminant !

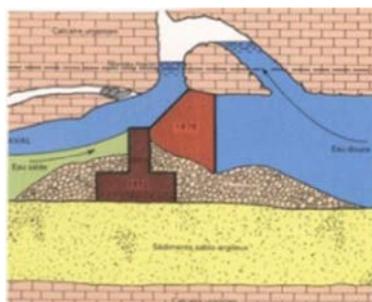


Fig. 4 : coupe galerie au droit du barrage

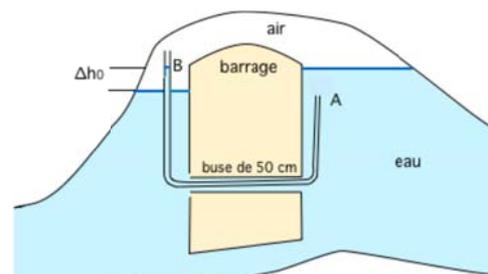
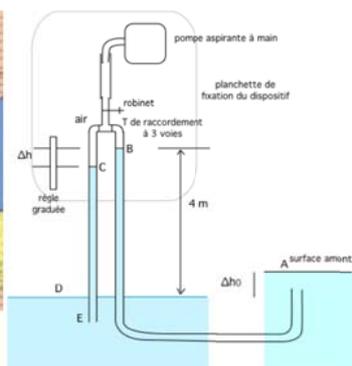


Fig. 6- lecture de niveaux

Fig. 5- tuyau branches AB et CE

La mesure de la dénivellation $\Delta h'$ est quasiment égale à la dénivellation Δh_0 . Des mesures simultanées de la différence de niveaux amont aval barrage et du débit par dilution d'un traceur fluorescent (Voir infra) ont été réalisées le 24/10/2009 et le 20/05/2010 permettant ainsi de donner une première valeur numérique à K. Le caractère constant de K n'est cependant pas garanti. On peut penser que lorsque l'eau monte en amont du barrage, elle peut emprunter de nouvelles fuites, ce qui doit augmenter la valeur de K.

	Débit mesuré par dilution (m ³ /s)	Dénivellation mesurée au barrage (m)	k (m ^{1/2} /s)
24/10/2009	6.5	0.11	19.6
20/05/2010	7.23	0.1	22.9

2.2.2. Le contrôle en continu

L'Université de Provence exploite des capteurs de pression qui mesurent la différence d'altitude piézométrique entre l'amont et l'aval du barrage. Ces informations peuvent être valorisées pour construire une chronique de débits dans la galerie de Port Miou. Trois limites sont cependant identifiées :

Cette méthode est valable en l'absence de débordement du barrage. Dans ce cas on utilisera les hauteurs de déversement pour connaître les débits en utilisant l'abaque établi par le concepteur du barrage et en y apportant les corrections pour tenir compte des pertes.

Des oscillations amont et aval - déjà observées par le SRPM - l'ont été également sur le dispositif installé. Ces oscillations (houle, relaxation,...) méritent d'être examinées sur une période de temps suffisante et avec un pas de temps suffisamment fin.

La précision sur la constante k est estimée à 10%, au moins pour les débits d'étiage ou de pluviométrie faible.

2.3. Vélométrie

Si comme on l'a vu supra, l'exploration complète du champ des vitesses dans une section était illusoire dans le cas de la galerie de Port Miou mais la mesure d'un profil de vitesses jugé représentatif de la vitesse moyenne reste une possibilité intéressante pour contrôler le débit de manière permanente.

Mesures de débit à partir des Vitesses dans les buses du barrage

L'existence du barrage a tout naturellement amené à utiliser un *opercule calibré* -une buse traversant le barrage- mais les pertes liées à cet ouvrage mettent en cause la validité de la mesure. Elle n'a de valeur pour accéder au débit que si l'on connaît de façon suffisamment précise les pertes liées à l'environnement du barrage : fuites par les joints de strates, diaclases, buses enfouies, circulations sous barrage...Or ces fuites non négligeables doivent être prises en compte. Des tarages réguliers par la technique de dilution permettraient de les évaluer.

La mesure de la vitesse dans une buse a été effectuée à partir d'un profileur à effet Doppler V-ADCP de chez « TELEDYNE RD Instruments ». L'appareil envoie un signal acoustique codé dans trois directions et calcule la vitesse et direction du courant en trois dimensions par traitement de l'écho du signal. Un quatrième faisceau, vertical, mesure la hauteur d'eau avec une résolution millimétrique. Si la section du conduit est connue, le logiciel fournis permet de mesurer le débit dans des conduits, en charge ou non. L'électronique, non immergeable est séparée de la partie acoustique.

Mesure de débit par procédé acoustique (type ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler)

Lorsqu'il est difficile voire impossible de réaliser une exploration fine du champ des vitesses, on peut mettre en place une mesure de vitesse sur une portion de la section, jugée représentative de la vitesse moyenne V_m . Si l'on nomme V_e (Vitesse échantillon) la vitesse partielle mesurée, la relation (1) devient :

$$Q_i = K.V_e \quad (4)$$

K est sensé représenté la section d'écoulement S et le rapport entre la vitesse moyenne de l'écoulement et V_e . On suppose que ce rapport est constant mais en pratique, il ne l'est certainement pas.

Pour tester cette méthode nous avons mis en œuvre un profileur de courant (ADCP) prêté par « TELEDYNE RD Instruments ». L'utilisation de ce type d'appareil est en cours d'être complétée par des mesures de section utilisant un sonar rotatif et des équipements de topographie automatique. C'est un profileur de courant à effet Doppler type Workhouse ADCP Sentinel qui a été testé. L'appareil envoie un signal acoustique codé dans quatre directions et calcule la vitesse et direction du courant en trois dimensions par traitement de l'écho du signal. Cet appareil a été déployé en mode automate sur le site de Port-Miou. Malgré la faible concentration de matières en suspension et la proximité des parois, le WH ADCP a mesuré des profils de vitesses dans une gamme allant du mm/sec à 20 cm/sec avec une résolution temporelle d'une minute. Ce déploiement a été répété à chaque fois que la disponibilité de

l'appareil le permettait. La technique « Broadband », spécifique à cette gamme de matériel, a montré ici toute sa pertinence pour la mesure de vitesse faible en conditions difficiles. Lismonde 2011 a montré par une approche hydraulique que le coefficient K pouvait être évalué à 110 m² et lors du jaugeage du 24/10/2009, la vitesse moyenne mesurée de 5 cm/s a permis de déduire une valeur de K de 125 m². On a retenu pour la suite la valeur de 110 m² car estimée à partir d'un échantillon de données plus conséquent.

Lismonde et al. (2011) ont également proposé un facteur de correction de 3,3 aux débits qui avait été proposés par Cavalera dans sa thèse à partir des mesures qui avaient été faites directement dans les buses du barrage en négligeant les fuites latérales. Le débit moyen d'eau douce pour la période allant de mai 2005 à octobre 2006 peut ainsi être estimé aujourd'hui à 3,3 m³/s plus cohérent avec les valeurs moyennes établies par le SRPM entre 1969 et 1971 (3 à 4,5 m³/s)

4. Orientations - Conclusions

Il est possible d'orienter la poursuite des investigations en proposant un protocole amélioré de mesures sur le volet de la quantification des débits.

La mesure en continu du débit dans la résurgence de Port Miou est impossible à cause de la configuration de l'écoulement dans une galerie dont la géométrie est très hétérogène. Cependant, les mesures par dilution globale effectuées ont montré qu'il était tout à fait envisageable d'effectuer des mesures ponctuelles du débit selon cette méthode. Pour constituer une chronique continue de débits, il faut une méthode qui consiste à mesurer un ou plusieurs paramètres dont la variation puisse être rattachée à la variation du débit. La relation entre la variation des paramètres mesurés et la variation du débit sera établie à partir des mesures absolues (jaugeages) qui seront réalisés. La mesure de la différence de niveaux (ligne piézométrique) entre l'amont et l'aval du barrage est probablement la plus simple pour un contrôle des débits. Elle présente l'avantage notable de nécessiter moins de jaugeages pour établir la relation d'étalonnage. Mais elle est, au stade actuel, mal adaptée aux périodes d'étiage par manque de précision. Or c'est la période critique pour toute exploitation envisagée. Quelques dispositions peuvent l'améliorer valorisant ainsi l'ensemble de l'historique constitué par l'Université de Provence.

La technique du contrôle par mesure d'un profil de vitesses par technique ADCP permet des mesures fines pour des débits d'étiage. Elle reste pertinente à condition de réaliser suffisamment de jaugeages pour établir la relation entre la vitesse moyenne du profil et le débit. Une relation « Vitesse moyenne du profil-Débit » pourra être établie.

Il va de soi que la mesure de la salinité reste nécessaire pour quantifier la part de l'eau douce dans le débit mesuré.

Au final, on peut dire que le maintien en opérationnel des deux techniques, permettrait d'assurer une meilleure continuité dans l'établissement de la série chronologique de débits. Par exemple, les difficultés possibles du contrôle piézométrique liées aux faibles dénivellations entre l'amont et l'aval du barrage pourraient être compensées par l'utilisation de l'ADCP dans ces conditions d'écoulement

Références bibliographiques

- André H., 1960 Méthode chimique de dilution, Procédé par intégration – Mémoires&travaux de la SHF
- LISMONDE B., ARFIB B., PERRET C., MICHEL L., DOUCHET M. & POTIÉ L. (2011) La mesure des débits de la source sous-marine de Port Miou (Cassis, France) - Proc. H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon (France) 1-3 sep. 2011, p. 301-306
- Cavalera T. 2007 Etude de fonctionnement du bassin d'alimentation de la source sous marine de Port Miou (Cassis Bouches du Rhône) Approche multicritère - Thèse de doctorat
- Potie Ricour Tardieu, 2005, "Port Miou investigations (1964-1978) "aih.- Int. Conf. Problems in Karst - CVJIĆ - Belgrad-Kotor – 2005
- Perret C. Et al 2011 Le réseau d'observations hydroclimatologiques de montagne d'EDF Etat des lieux et mesures de débit par dilution d'un traceur fluorescent. Actes du congrès SHF mars 2011
- Potie L Tardieu B 1976 Aménagements et captages sous-marins dans les formations calcaires, International Congresskarst hydrology 1976, Huntsville, Alabama, USA
- Tardieu B 2005, "Groundwater Management of Coastal Karstic Aquifers", (P;286-294) COST Action 621
- Tardieu B. Londe P 1973 Le barrage de Port Miou. Congrès de la commission des grands barrages. Madrid
- Tulipano L. et al 2005, "Groundwater Management of Coastal Karstic Aquifers - European cooperation in the field of scientific and technical research, EUR 21366