

MESURES DE DÉBIT DANS LES RÉSEAUX KARSTIQUES NOYÉS ET PÉNÉTRABLES - DIFFÉRENTES APPROCHES TESTÉES – DIFFICULTÉS ET ÉCHECS - QUELLES PRÉCISIONS EN ATTENDRE

JM Cravero (Past DR EDF - jmcravero@orange.fr), Thierry Carlin (?), Marc Douchet (CRPS-FFESSM douchet.charlotte@wanadoo.fr), Loïc Michel (TélédyneRdInstrument,- lmichel@teledyne.com), Christian Perret* (-EDF DTG - christian.perret@edf.fr), Louis Potié (louispotie@aol.com), B.Tardieu (Velcanenergy -Past Pdg Coyne-Bellier - tardieu@velcanenergy.com)

Résumé

L'Association "Cassis Mystérieuse" a repris, sous l'impulsion de la Ville de Cassis, les études du Syndicat de Recherches de Port-Miou, (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. Après l'obturation de la galerie (1977) les débits avaient pu être mesurés, aux fuites près liées à l'environnement du barrage, en période de hautes eaux entraînant des déversements sur l'évacuateur de crue. Mais les débits (fuites) restaient inconnus dès lors que ce déversement ne se faisait plus.

Abstract

The "Association" (*non-profit Organization*) "Cassis-RivièreMystérieuse" **supported** by the city of Cassis has resumed studies, **undertaken by** the "Syndicat de Recherches de Port-Miou" (SRPM) Brgm, Coyne and Bellier, Sem) from 1968 to 1980, on underground and undersea "rivers" of Cassis. These studies are focused on low level **flow measurement**, a preliminary to any **exploitation**, whatever its purpose. Marseille Provence University researchers are also studying this issue: a thesis was defended "Cavalera-2007" and the "Karsteau" program was implemented.

Before the total **closure** of the gallery, between 1972 and 1976, **it was not possible to determine accurate flow rates, at best estimates could be made during very** low water periods when flow velocity could be measured in mm/s, in a gallery more than 200 m² in section. After the closure of the gallery (1977), flow rates had been measured, not taking into account leakage related to the environment of the dam, during periods of high waters **leading to overflow** on the spillway. But flows (leaks) **could not be measured when there was no more overflow.**

I INTRODUCTION

La construction d'une chronique des apports en eau douce de la source de Port Miou constitue 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. Elle a contacté (2008) la Division Technique Générale (DTG) d'Électricité de France (EDF) au double titre de son expertise reconnue développée dans l'hydrologie quantitative des cours d'eau et de son savoir-faire dans les instrumentations à mettre en œuvre.

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 débuts 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.

II 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 qui sont représentatives du débit. Une loi d'étalonnage ou de tarage qui lie le débit et le ou les

paramètres doit être construite à partir de mesures de **débit que l'on appelle encore 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 directions étaient nombreuses pour atteindre cet objectif de mesure "fine" de débit.

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 étaient 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 reposaient sur des mesures de pressions :

- la mesure 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.

III LES MESURES DIRECTES DE DÉBIT OU JAUGEAGES

L'objectif est d'obtenir une estimation relative des débits par une mesure absolue d'étalonnage.

The objective is to calculate a relative estimate of flows with an absolute gauging/calibration measure.

III.1 Exploration du champ des vitesses

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

The most obvious expression of the flow rate through a loaded conduit is given by:

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

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 obtenir ces mesures dans des galeries du type Port-Miou 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, température..) ont été observés ! *Si un régime turbulent très limité n'empêche pas une stratification de la salinité ou de la température de l'écoulement, il n'en va pas de même pour la distribution des vitesses qui obéit à des mécanismes de transfert bien spécifiques.*

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. "".

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.

III.2 Mesure instantanée de débit par dilution d'un traceur fluorescent

Une première mesure de débit (jaugeage) 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 (Association et Université) a répété l'opération avec succès en mai 2010 avec l'aide d'une équipe de plongeurs (membres de l'association).

IV LES CONTRÔLES DE DÉBIT

IV.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, $t^0 \dots$

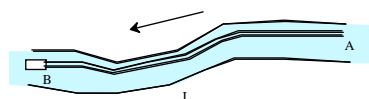


Fig 3

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 :

$$Q = K\sqrt{H_B - H_A} \quad (3)$$

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.

IV.2 Mesure de pression différentielle de part et d'autre du barrage

IV.2.1 Principes et premiers résultats

Un niveau à 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 (1) établie précédemment reste applicable à ce cas de figure

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

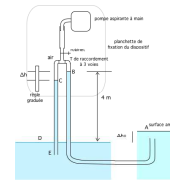
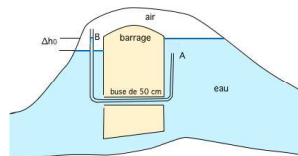
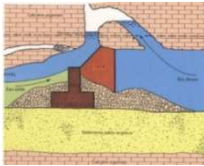


Fig. 4 : coupe galerie au droit du barrage, gallery cross-section at the dam level

Fig. 5- tuyau branches AB et CE, hoses connected to AB and CE

Fig. 6- lecture de niveaux, level reading

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 permettant ainsi de donner une première valeur numérique à K qui a été évaluée à $18 \text{ m}^{5/2}/\text{s}$.

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.

IV.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.

1. 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 (Référence [5]) et en y apportant les corrections pour tenir compte des pertes.
2. 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.
3. La précision sur la constante k est estimée à 10%, au moins pour les débits d'étiage ou de pluviométrie faible.

IV.3 Vélométrie

Si comme on l'a vu précédemment, 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.

IV.3.1 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.

IV.3.1.1 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 :

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

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. Dans le cas plus général où le profil des vitesses ne se conserve pas en fonction du débit, la relation entre V_e et V_m n'est plus linéaire et il convient alors d'introduire un exposant b . L'expression la plus générale devient donc :

$$Q_i = K.Ve_i^b \quad (5)$$

Pour tester cette méthode nous avons mis en œuvre un profileur de courant, (ADCP) prêté par "TELEDYNE RD Instruments".

Des mesures de section vont être effectuées avec 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 automne 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 vitesse dans une gamme de vitesse 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.

"Broadband" technology, specific to this type of device proved its relevance for the measurement of low speed in a challenging environment

En exploitant les mesures de vitesses réalisées par l'ADCP mis à disposition par RDI de début septembre à début octobre 2009, on a tenté d'évaluer la faisabilité d'un contrôle efficace en continu.

En moyennant les vitesses mesurées sur la journée et en les ramenant aux normes par rapport à la moyenne des vitesses mesurées, on obtient la représentation suivante :

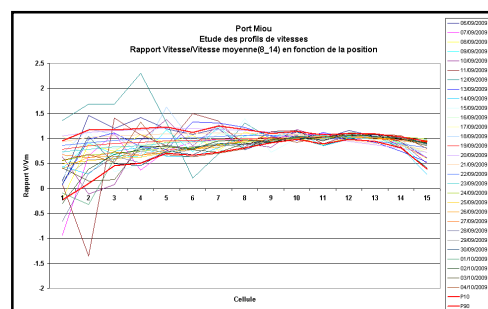


Fig 7

On constate que la loi qui relie la vitesse moyenne et le débit n'est probablement pas linéaire comme supposé avec la relation (5) et qu'on ne peut pas extrapoler la relation constatée pour un point de fonctionnement, à l'ensemble de la gamme des débits possibles.

Pour établir cette relation il conviendrait par conséquent, de réaliser de nombreux jaugeages.

Numerous gauging using the dilution method will be required to establish the flow rate curve.

On peut conclure que la technique du contrôle par mesure d'un profil de vitesses par technique ADCP reste pertinente à condition de réaliser suffisamment de mesures de contrôle pour établir la relation entre la vitesse moyenne du profil et le débit (6 à 7 mesures entre <1 et 10 m3/s)

V ORIENTATIONS – CONCLUSIONS PROSPECTIVES - 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.

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.

Bibliographie

[1] Détermination du débit par mesure de la perte de charge entre deux points (B. Lismonde, 28 novembre 2006 - Site «rivieresmysterieuses.org»).

[2] Ch. Perret et Arfib, Lismonde - Site "rivieresmysterieuses.org"

[3] Ch. Perret Compte rendu et dépouillement du jaugeage du 24 octobre 2009 - -section "Actions en cours"

[4] J.M Cravero "Site Internet "Rivieresmysterieuses.org"

[5] B.Tardieu Coyne et Bellier - SRPM -1977-1978

[6] Cavallera T. - 2007 - Etude de fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous marine de Port Miou (Cassis Bouches du Rhône) Approche multicritère - Thèse de doctorat

[7] André H. (1960) – Méthode chimique de dilution – Procédé par intégration – Mémoires et travaux de la SHF décembre 1960.

Potié L., Ricour J., Tardieu B : PORT-MIOU AND BESTOUAN FRESHWATER SUBMARINE SPORING (Cassis – France) - investigations AND and woks (1964-1978) AIH. Int. Conference & Field Seminar –Water Resources & Environmental Problems in Karst - CVIJIC - Belgrad-Kotor - 2005