



Le 27/09/2010

Mesure du débit par dilution d'un traceur chimique (uranine) à la rivière souterraine de PortMiou le 30 mai 2010

Par Bruno ARFIB^(1,a), Baudouin LISMONDE⁽²⁾, Marc DOUCHET^(2,3)

⁽¹⁾ Université de Provence, ⁽²⁾ Association Cassis Rivière Mystérieuse, ^(2,3) Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-Marins

Préambule : Ce rapport complète le compte-rendu de la journée du 30 mai 2010 écrit par Baudouin Lismonde, ainsi que le rapport sur les mesures sous-marines par effet Dopplet de Loïc Michel.

Ce rapport détaille la mesure du débit par dilution d'un traceur chimique (uranine) réalisée à la rivière souterraine de PortMiou le 30 mai 2010. Cette mesure est à l'initiative de l'Association Rivière Mystérieuse, en association avec l'Université de Provence, Teledyne RD Instrument et les plongeurs-spéléo.

Le débit est calculé suivant deux hypothèses :

1- Hypothèse du débit constant durant l'expérience

Les calculs sont faits avec deux jeux de données : un pas de temps constant des données acquises de 15 minutes, et avec un pas de temps des données acquises variable entre 5 et 15 minutes (5 minutes durant le pic de passage du traceur).

2- Hypothèse du débit variable durant l'expérience en fonction de la marée

Les calculs sont faits pour deux conditions :

- méthode 2.1 : cas simple avec calcul de K fonction du débit,
- méthode 2.2 : calcul de K pour un débit variable représenté par une fonction Q/Q_0 .

Participants aux différentes opérations : Bruno Arfib, Pierre-Alexis Astorgueff, Marc Douchet, Maxence Fouilleul, Michel Guis, Baudouin Lismonde, Loïc Michel, Nicolas Michel, Adèle Mirlit, Ivane Pairaud, Marc Renaut, Laurent Tarazona.

1- Matériel de mesure

Les résultats présentés reposent sur l'interprétation des données acquises sur les appareils de mesure installés dans le cadre du projet KarstEAU (Université de Provence). Les pressions sont mesurées par des sondes STS, la fluorescence de l'eau par un spectrofluorimètre de terrain GGUN (#807). Ce matériel est permanent sur le site, relié à un datalogger central et un GSM. Les mesures sont faites au même pas de temps que l'enregistrement.

^a Contact : Bruno ARFIB – Université de Provence
Laboratoire de Géologie des Systèmes et Réservoirs Carbonatés
Case 67 - 3 place V. Hugo - 13331 Marseille cedex 3
Tel : 04 13 55 07 48
email : bruno.arfib@univ-provence.fr

La mesure par dilution a été possible par l'injection d'uranine à environ 250 mètres en amont du barrage sous-marin de Port Miou par Marc Douchet et ses coéquipiers (Laurent Tarazona, Michel Guis, Marc Renaut).

2- Méthodes

La mesure du débit a été réalisée par dilution d'un traceur chimique fluorescent (uranine), par injection instantanée d'une masse connue de traceur, et mesure en continu de la fluorescence de l'eau lors du passage du nuage de traceur en aval du point d'injection. Le traceur est conservatif, sa concentration est homogène dans toute la masse d'eau au point de mesure.

2.1- Hypothèse du débit constant durant l'expérience

La méthode de calcul du débit a été détaillée dans le compte-rendu de la mesure du débit à PortMiou du 24 octobre 2009 (Christian Perret).

$$Q = \frac{M}{\int C(t) - C_0 \cdot dt} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{M}{(C_m - C_0) \cdot T}$$

Q: débit, M: Masse injectée, C(t) : la concentration du traceur au point de mesure au temps t, C₀ : la concentration initiale de l'eau, C_m : concentration moyenne pendant le temps T, T : temps de passage total du traceur au point de mesure

2.2- Hypothèse du débit variable durant l'expérience en fonction de la marée

Cette seconde méthode a été proposée par Baudouin Lismonde, permettant de calculer le débit en tout temps en fonction de la différence de niveau d'eau entre l'amont (H_{amont}) et l'aval (H_{aval}) du barrage. Une note explicative de la méthode est donnée en Annexe 1.

Le débit (en m³/s) est variable au cours du temps, et il est fourni par une relation de la forme :

$$Q = K \sqrt{H_{am} - H_{av}}$$

La masse de traceur injectée est liée au débit par : $M = \int_0^{\infty} Q(t)C(t)dt = K \int_0^{\infty} \sqrt{H_{am} - H_{av}} C(t)dt$

$$\text{On en tire : } K = \frac{M}{\int_0^{\infty} \sqrt{H_{am}(t) - H_{av}(t)} C(t)dt}$$

Une seconde méthode consiste à représenter le débit variable par une fonction :

$F(t) = Q/Q_0$, Q₀ étant le débit au début de l'opération pour lequel une dénivellation sur le niveau d'eau de PortMiou a été mesurée (ΔH_0)

$$Q_0 = \frac{M}{\int_0^{\infty} \frac{Q(t)}{Q_0} C(t) \cdot dt} \quad \text{ou} \quad Q_0 = \frac{M}{\int_0^{\infty} \frac{\sqrt{H_{am}(t) - H_{av}(t)}}{Q_0} C(t) \cdot dt} \quad \text{et} \quad K = \frac{Q_0}{\sqrt{\Delta H_0}}$$

3- Conditions hydrologiques :

Le débit de la source de Port Miou est relativement important en cette fin de printemps, en rapport avec la saison hivernale 2009-2010 pluvieuse. Au jour de la mesure, la source n'est pas en crue. Les plongées ont eu lieu le 30 mai 2010 entre 12h et 15h, alors que la marée est descendante (Figure 1, Figure 4).

4- Injection d'uranine et suivi temporel de la fluorescence de l'eau

Le plongeur Marc Douchet a dispersé dans le courant de la rivière souterraine de PortMiou une solution de fluorescéine à 12h38 le 30/05/10 (heure d'été). La solution était la même que

celle employée lors de la mesure précédente le 24 octobre 2009. L'injection a eu lieu à environ 250 mètres en amont du barrage. Le parcours du plongeur est suivi grâce au système de mesure basé sur l'effet Doppler "Cobra Tac" mis à disposition par Loïc MICHEL de la société Teledyne (Figure 0).

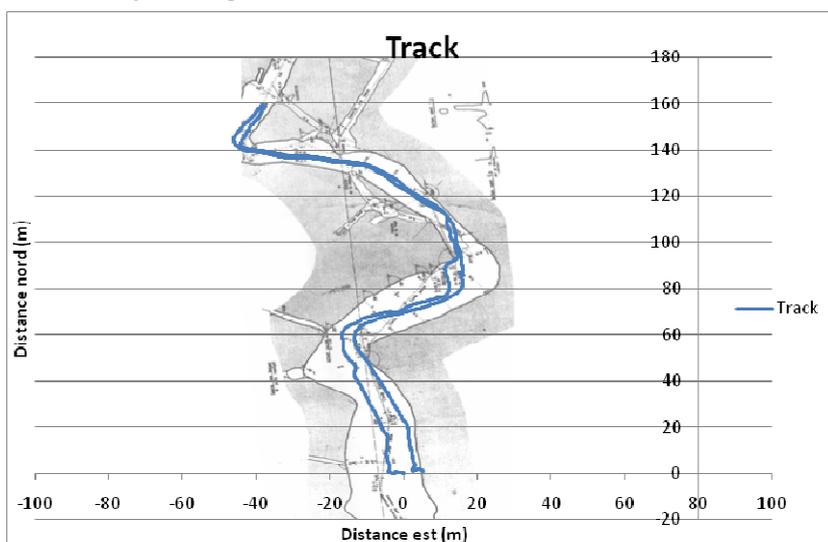


Figure 0 : Tracé en plan du parcours du plongeur à partir du barrage au sud (ligne bleue), positionné sur la topographie des plongeurs. Injection au point le plus au nord. Extrait de Michel L. 2010.

Les masses injectées sont données ci-dessous :

Masse injectée de solution d'uranine = 273,08 g

Concentration initiale de la solution = 435 kg/m^3 (C_{fluo})

Masse volumique de la solution = 1186 kg/m^3 (ρ)

Masse de fluorescéine injectée = 0,1 kg (= 100 g) ($m = M C_{\text{fluo}} / \rho = 0,27308 \cdot 435 / 1186$)

Le suivi temporel de la fluorescence a été réalisé au pas de temps de 15 minutes, et resserré au pas de temps de 5 minutes lors du passage du pic de concentration entre 14h10 et 15h20 (heure d'été) (Figure 1). La courbe de restitution a la forme attendue.

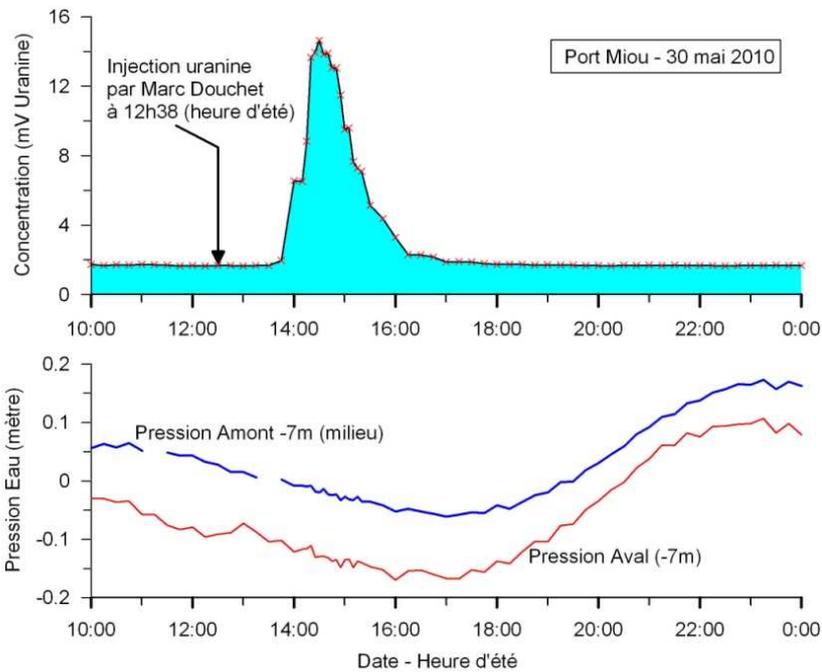


Figure 1a : Evolution de la concentration en fluorescéine (fig. 1a en mV, fig. 1b en concentration initiale, fig. 1c en kg.m^{-3}) et des pressions amont et aval au barrage souterrain de Port Miou le 30 mai 2010 lors de la mesure du débit

Les résultats sont donnés graphiquement dans différentes unités : mV (mesure directe du spectrofluorimètre) (figure 1), fonction de la concentration initiale de la solution injectée (C_0) (figure 1b), en concentration absolue (kg.m^{-3}) (figure 1c).

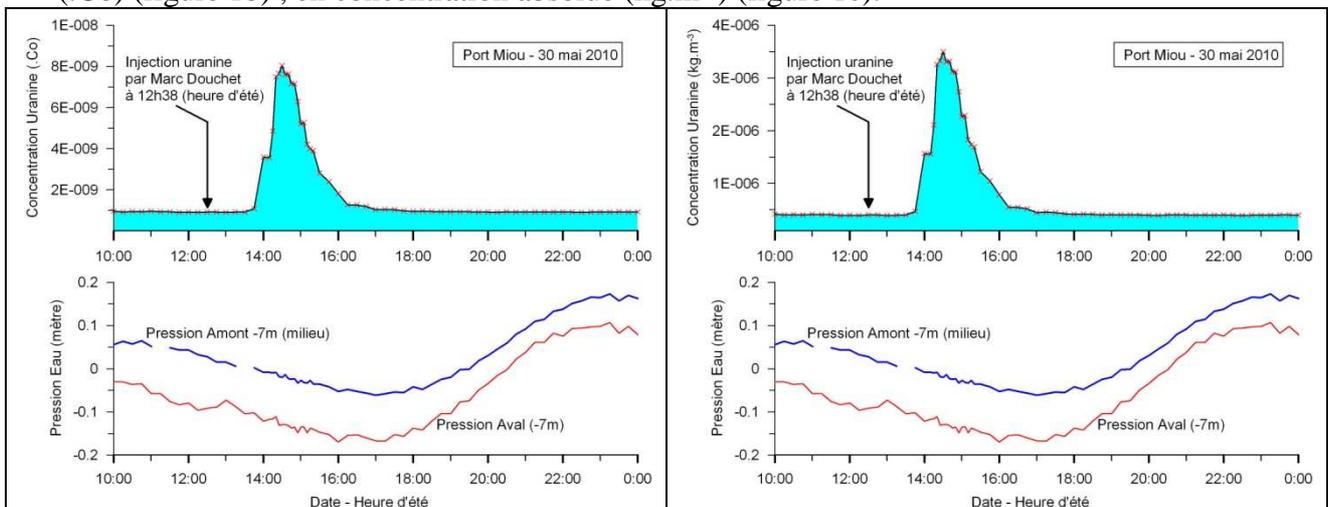


Figure 1b à gauche, Figure 1c à droite.

5- Calcul du débit suivant l'hypothèse d'un débit constant durant l'expérience

L'intégrale de la concentration au cours du temps est réalisée sur les données entre le 30/05/2010 13h30 (temps de première arrivée du traceur) et le 30/05/2010 19h15 (temps estimé de retour à la valeur initiale) (Figure 2).

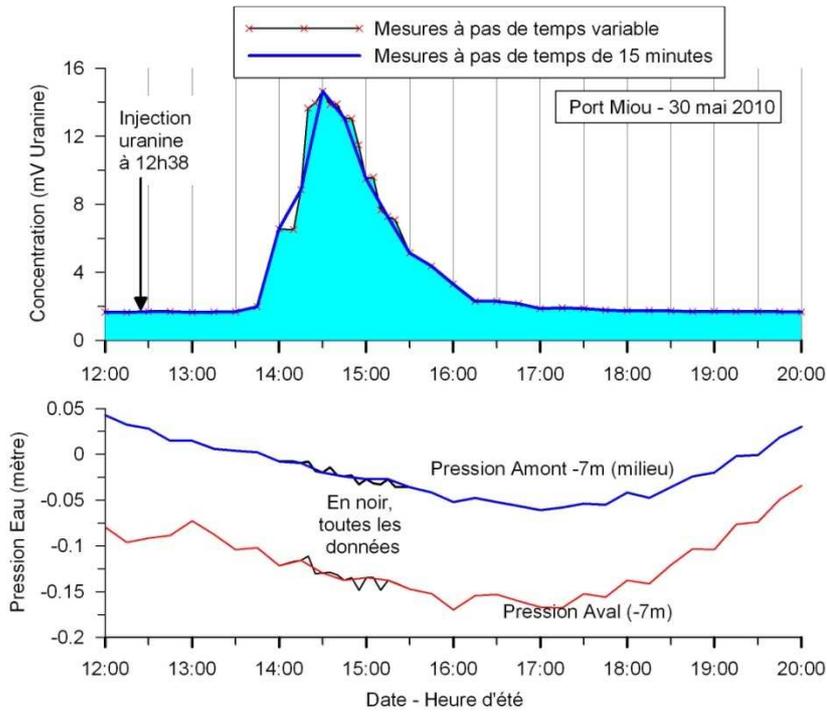


Figure 2 : Représentation des données de concentration et de pression de PortMiou à différents pas de temps d'acquisition.

Le calcul du débit est fait en exploitant un jeu de données partiel au pas de temps de mesure et d'enregistrement de 15 minutes (tableau 1). L'intégrale est remplacée par le calcul de la valeur moyenne d'augmentation de concentration sur le temps de passage total du traceur. Le débit obtenu est égal à $7,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Une variante de ce calcul consiste à utiliser le volume de solution de fluorescéine injecté plutôt que la masse (ce qui reviendra finalement au même!). Le calcul donne alors $7,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (méthode utilisée sur l'expérience du 24 octobre 2009).

Lorsque toutes les données sont exploitées (pas de temps de mesure et d'enregistrement variant entre 5 et 15 minutes), le calcul du débit est égal à $7,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tableau 2, figure 2).

Calcul du débit par dilution d'uranine - hypothèse du débit constant au cours de la mesure				
Pas de temps de mesure constant = 15 minutes				
$Q=M/((C_m-C_i).T)$			$Q=V_i/(D_{\text{moy}} . T)$	
M uranine (kg)	0.1		Masse solution injectée (kg)	2.73E-01
C_m (mV)	4.2		Rho (kg/m ³)	1186
C_i (mV)	1.68		V_i (m ³)	2.30E-04
C_m-C_i (mV)	2.52		C_m-C_i (mV)	2.52
C_o (kg/m ³)	435		C_o/mV	5.49E-10
C_o/mV	5.49E-10		$D_{\text{moy}} (.C_o)$	1.38E-09
C_m-C_i (kg/m ³)	6.0181E-07		$T=T_i-T_f$ (s)+dt	21600
T_i (s)	1275219000	30/05/10 13h30	Q (m³/s)	7.71
T_f (s)	1275239700	30/05/2010 19h15		
$T=T_i-T_f+dt$ (s)	21600			
$(C_m-C_i).T$	0.012999			
Q (m³/s)	7.69			

Tableau 1 : Synthèse des résultats du calcul du débit suivant l'hypothèse du débit constant au cours de la mesure, avec un pas de temps de mesure constant égal à 15 minutes

Calcul du débit par dilution d'uranine - hypothèse du débit constant au cours de la mesure			
Même calcul mais en utilisant toutes les mesures quelqusoit le pas de temps d'acquisition			
Pour cela, la valeur de (C-Ci).dt est intégrée sur le temps T :			
Voir colonne V du fichier DonneesArfibTetraedre300510au310510.xls/feuillePasdeTempsOrigine			
Somme(Ct-Ci).dt	0.013328064		
Q (m3/s)	7.50		

Tableau 2 : Synthèse des résultats du calcul du débit suivant l'hypothèse du débit constant au cours de la mesure, avec un pas de temps de mesure variable (5 minutes durant le pic de concentration, 15 minutes sur le reste des mesures).

6- Calcul du débit suivant l'hypothèse d'un débit variable durant l'expérience en fonction de la marée

Dans ce cas, le débit peut être calculé en tout temps une fois la constante K déterminée, et pour toute différence de charge entre l'amont et l'aval du barrage connue.

La première méthode de calcul (méthode 2.1) donne, pour un passage du traceur entre 13h30 et 19h15 :

La constante K est égale à 22,6 en exploitant toutes les données disponibles (Tableau 3). Le débit moyen durant l'expérience est égal à $7,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Débit Variable au cours du temps en fonction des différences de pression Amont-Aval du barrage	
Méthode 1 : calcul de K simple	
Q=K.racine(Pamont-Paval)	
Pamont : pression à l'amont du barrage (m)	
Paval : pression à l'aval (m)	
K : constante déterminée durant l'expérience par dilution	
K=22.6	(K=23.4 avec le pas de temps 15 minutes)
Valeur du débit durant l'expérience, entre 13h30 et 19h15, le 30/05/10	
Q min (m3/s)	6.18
Q max (m3/s)	7.76
Q moyen (m3/s)	7.30

Tableau 3: Synthèse des résultats du calcul du débit suivant l'hypothèse du débit variable au cours de la mesure, avec un calcul simple de K

La seconde méthode de calcul (méthode 2.2) utilise une fonction Q/Q_0 pour représenter les variations de débit au cours de l'expérience. Q_0 est le débit engendré par une différence de charge entre l'amont et l'aval du barrage prise égale à 10 cm, correspondant à la valeur lue sur le niveau à eau installé le 30/05/10 vers 13h45. Les calculs ont été réalisés par Baudouin Lismonde sur une période de temps légèrement plus large, de 13h30 (heure de première arrivée du traceur) à 20h45 (heure supposée de fin du passage total du nuage de fluorescéine). Les résultats sont donnés dans le tableau 4 et la figure 3:

$$K = 22,9, Q_0 = 7,23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ et } Q \text{ moyen} = 7,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ (entre 13h30 et 19h15)}$$

Débit Variable au cours du temps en fonction des différences de pression Amont-Aval du barrage	
Méthode 2 : Le calcul de K avec une fonction Q/Qo	
Q=K.racine(Pamont-Paval)	
Pamont : pression à l'amont du barrage (m)	
Paval : pression à l'aval (m)	
K : constante déterminée durant l'expérience par dilution, entre 13h30 et 20h45, le 30/05/2010	
K=22.9	
Valeur du débit durant l'expérience, entre 13h30 et 19h15, le 30/05/10	
Q min (m3/s)	6.24
Q max (m3/s)	7.84
Q moyen (m3/s)	7.36
Qo	7.23

Tableau 4 : Synthèse des résultats du calcul du débit suivant l'hypothèse du débit variable au cours de la mesure, avec un calcul de K utilisant une fonction Q/Q_0

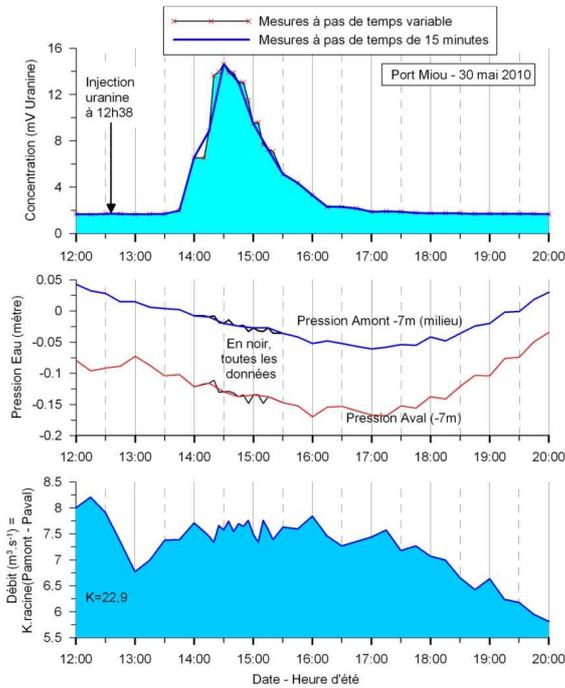


Figure 3 : Evolution au cours du temps de la concentration, des pressions et du débit calculé (suivant la méthode 2.2) du calcul de K avec une fonction Q/Q_0 le 30 mai 2010

Le débit a ensuite été reconstitué pour la chronique de mesure de hauteur d'eau du 30 et du 31 mai 2010 (figure 4). Il apparaît clairement qu'en marée montante le débit baisse, et est maximum en marée descendante. Les chutes de débit calculées le 30 mai 2010 vers 11h et 13h sont dues à des erreurs de mesures du fait de la présence des plongeurs dans la vasque (plan d'eau perturbé et support des sondes pressions tiré par les plongeurs).

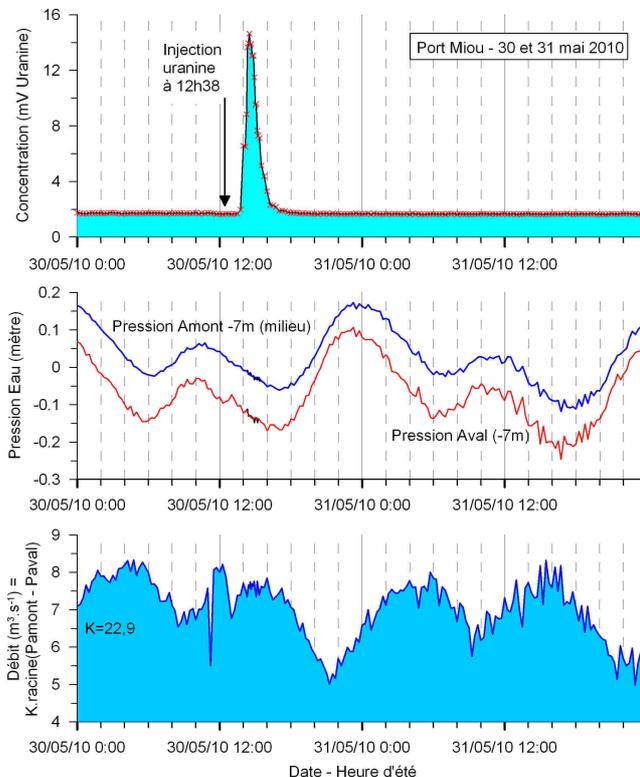


Figure 4 : Evolution de la concentration en uranine, des pressions et du débit calculé (suivant la méthode 2.2) les 30 et 31 mai 2010.

7- Conclusion

Cette deuxième mesure du débit par dilution d'un traceur chimique est une réussite. Quatre méthodes de calculs ont été utilisées. La dernière méthode présentée est retenue. Le facteur K a ainsi été évalué à 22,9 (unité SI), permettant de calculer le débit pour toute dénivellation amont-aval du barrage de PortMiou (sans débordement). Le débit moyen pendant l'expérience du 30 mai 2010 était de $7,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ce type de mesure est à recommencer.

Remerciements

Merci à tous les participants pour avoir permis la mise en oeuvre et la réussite de cette journée d'action et de collaboration.

Merci au Conservatoire de l'espace littoral et des rivages lacustres qui a permis l'accès au site.

Références bibliographiques

Arfib B., Douchet M., Lismonde B., Michel L., Perret C., Potié L. (2009) compte rendu et dépouillement du jaugeage du 24 octobre 2009 - résurgence de port miou. Rapport sous la direction de Christian Perret (DTG-EDF). 9 pages

Michel L. (2010) Cobra-tac navigation. Compte-rendu manip du 30 mai 2010. 9 pages

Annexe 1

Détermination du débit de Port Miou par la méthode de dilution

Baudouin Lismonde, le 31 mai 2010

Un peu de théorie. On suppose connues les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du barrage de Port Miou. Ces hauteurs résultent de la donnée de la pression en un point fixe, corrigée par la pression atmosphérique.

On appelle $H_{am}(t)$ et $H_{av}(t)$ ces deux hauteurs qui sont donc variables mais connues au cours du temps.

Le débit (en m^3/s) est variable au cours du temps, et il est fourni par une relation de la forme :

$$Q = K \sqrt{H_{am} - H_{av}}$$

On a adopté une perte de charge quadratique, normale pour un écoulement bien turbulent. Cette propriété a été vérifiée expérimentalement en décembre 2008.

Dans cette relation, K est une constante inconnue. Si on la connaissait, on pourrait facilement avoir les débits puisqu'on mesure les deux hauteurs H.

L'opération de mesure. On injecte de la fluorescéine (masse M) et on suppose le bon mélange transversal obtenu. Ce bon mélange signifie, à Port Miou, qu'à un instant donné (t) les concentrations en tous les points de passage du barrage sont égales (les 2 buses de 100, les deux buses de 50, la grosse buse plus ou moins fermée, et la fuite latérale). Cette condition est suffisante.

Le bilan de masse du colorant s'écrit (on suppose en plus qu'il n'y a pas d'adsorption, donc pas de perte de colorant) :

$$M = \int_0^{\infty} Q(t)C(t)dt = K \int_0^{\infty} \sqrt{H_{am} - H_{av}} C(t)dt$$

Le produit QC représente le débit de colorant à chaque instant (en kg/s). D'où la constante K :

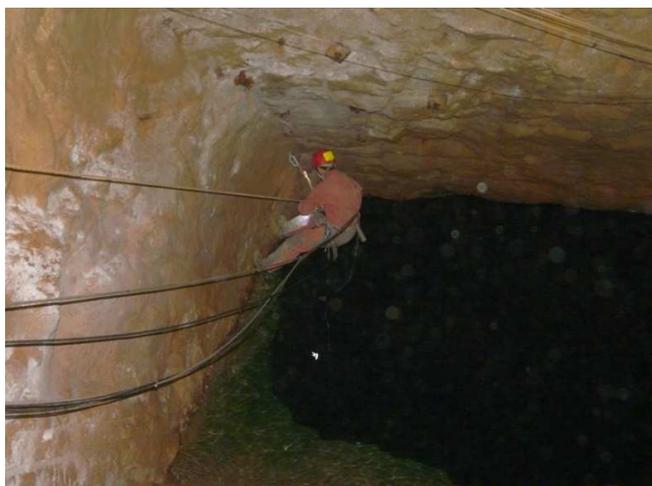
$$K = \frac{M}{\int_0^{\infty} \sqrt{H_{am}(t) - H_{av}(t)} C(t)dt}$$

En calculant l'intégrale sur tableur, la constante K fournissant le débit à chaque instant peut être déterminée.

Annexe 2 : Portofolio



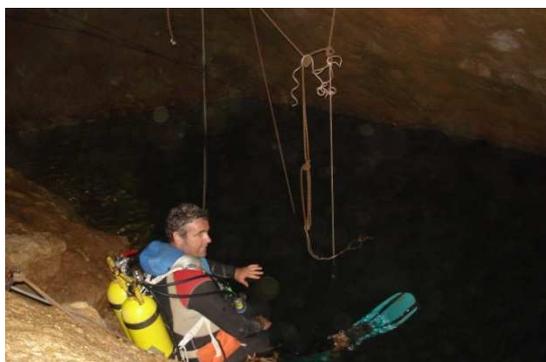
L'équipe du jour



Relève des sondes KarstEAU au dessus de la vasque amont



Passage du tuyau pour le niveau à eau Amont-Aval



Plongeurs



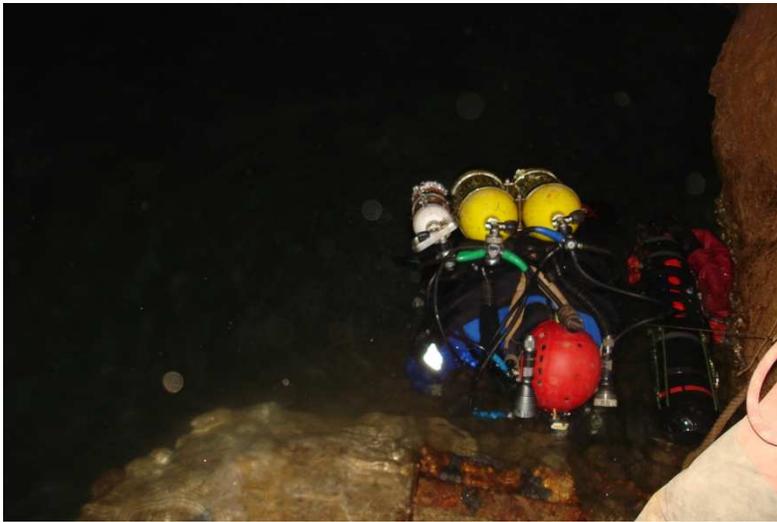
Fluorimètre GGUN avec anodes sacrificielles



Installation du niveau à eau!



Mesure de la dénivellation Aval-Amont sur le niveau à eau le 30/05/10 – 13h50 (heure d'été) : 10 cm



Mise à l'eau de Marc Douchet



"Workhorse Sentinel 1200 KHz" de Teledyne / Loïc Michel



"Cobra Tac Navigation" de Teledyne / Loïc Michel



Remontée du matériel du fond de la galerie souterraine de Port Miou