

FLUORIMETRE PORTABLE ET DISPOSITIF D'INJECTION DE TRACEUR POUR LES SUIVIS DES VARIATIONS RAPIDES DES DEBITS DE COURS D'EAU

Field fluorometer and injection device for gauging streams with fast variations

Pierre-André SCHNEGG

ALBILLIA Sàrl – Rue de l'Evole 13 – CH2000 Neuchâtel – info@albillia.com

Nous présentons ici le système que nous avons développé pour le jaugeage périodique de cours d'eau. Il s'agit d'un fluorimètre de terrain constitué d'une sonde, d'une valise d'acquisition de données avec affichage et support mémoire, et d'un câble de 15 à 30 mètres qui relie les deux parties. Ce matériel se prête parfaitement à la technique de jaugeage par dilution de traceur (méthode dite « globale » avec injection instantanée d'une masse de traceur). Si nécessaire, un traceur incolore peut être utilisé.

Nous associons le fluorimètre à un dispositif d'injection de traceur fluorescent, basé sur une bascule à augets, inspirée du pluviomètre. L'utilisation de ces deux pièces d'équipement nous permet d'effectuer une série de jaugeages à intervalle de temps fixe, sur une durée de un à plusieurs jours.

L'avantage de ce système, c'est qu'une fois installé, il mesure périodiquement le débit du cours d'eau sans intervention de l'opérateur, aussi longtemps que la réserve de solution n'est pas épuisée.

We present a system developed for the measurement of fast periodic stream gauging. The fluorometer consists of a field probe, a data logger with LCD display and flash cards, and a cable of 15 to 30 meters which connects the two parts. This system is adequate for measurements using the technique of tracer dilution (so-called "global method") in which a given mass of tracer is injected upstream. If necessary, a colorless tracer can be used.

We associate the fluorometer to an apparatus for injection of fluorescent tracer, based on the tipping bucket rain gauge. Using these two pieces of equipment allows us to perform a series of unattended flow rate measurements at a fixed time interval over a duration of one to several days.

The advantage of this system is that once installed, it periodically measures the flow rate of the water without operator intervention, as long as the solution reservoir is not depleted.

I INTRODUCTION

Lorsqu'on désire mesurer l'évolution temporelle du débit d'un cours d'eau à régime torrentiel, les méthodes cinématiques (moulinet, courantomètre électromagnétique) ne sont pas appropriées, à cause du type d'écoulement turbulent. Les méthodes dynamiques quant à elles (déversoirs, ouvrages étalonnés) nécessitent des installations fixes dont les coûts n'entrent généralement pas dans les budgets attribués. La méthode de choix est le jaugeage chimique, ou méthode par dilution. Elle consiste à injecter une quantité connue de substance chimique dont on sait mesurer en continu la concentration dans l'eau en aval du point d'injection. La substance peut être de nature ionique (sel). Sa concentration est alors déduite de l'accroissement de la conductivité électrique de l'eau. Mais généralement on utilise une substance fluorescente, car la sensibilité de l'appareil de mesure (le fluorimètre) est largement supérieure. En effet, à rapport signal sur bruit égal, 1 gramme d'uranine équivaut à 5 kg de sel.

Pour étudier la variation temporelle du débit d'un cours d'eau, il faut répéter la mesure à intervalles réguliers. Dans ce but, nous avons développé un système d'injection mécanique basé sur le pluviomètre à augets. Cet appareil délivre périodiquement une masse constante de traceur sous forme de solution concentrée. A distance convenable du lieu d'injection, nous installons un fluorimètre de terrain. A la fin du travail, les mesures successives de la concentration de traceur permettent de calculer l'évolution temporelle du débit du cours d'eau.

II RAPPEL DU PRINCIPE DE LA METHODE PAR DILUTION

La mesure de débit au moyen de la méthode par dilution repose sur la conservation de la masse de traceur qui traverse un profil quelconque du cours d'eau. Il y a une condition *sine qua non* pour obtenir un résultat correct, c'est l'homogénéité de la concentration du traceur sur un profil à l'endroit de la mesure. Un écoulement torrentiel favorise le mélange rapide de la solution concentrée. Un écoulement laminaire, tel qu'on l'observe dans un canal, n'est pas favorable. Mais dans tous les cas, l'opérateur doit estimer la distance suffisante à observer entre l'injection et la mesure, afin de respecter parfaitement cette condition d'homogénéité.

Le calcul du débit du cours d'eau utilise l'information suivante :

- masse m de traceur injecté (grammes).
- concentration corrigée $c(t)$ du traceur (grammes/L) mesurée par le fluorimètre en fonction du temps.

Le débit Q en litres par seconde est obtenu par (1), où t_1 et t_2 indiquent deux instants quelconques (en s) avant l'arrivée du panache et après son passage complet :

$$Q = \frac{m}{\int_{t_1}^{t_2} c(t) dt} \quad (1)$$

Afin de connaître et de tenir compte d'un éventuel niveau de bruit de fond c_0 de l'eau (turbidité, traces de substances fluorescentes), il faut ménager un intervalle de mesure avant la première injection de traceur. La concentration effective du traceur est donc $c(t) = c_m(t) - c_0$ où $c_m(t)$ est la concentration mesurée. La procédure détaillée a été décrite dans des compte-rendus récents [Schnegg *et al*, 2011] [Perret *et al*, 2012]. On y relève également l'importance d'une calibration locale du fluorimètre, au moyen d'un standard préparé avec le produit à injecter et l'eau du cours d'eau. Cette procédure permet de s'abstraire de multiples facteurs pouvant fausser la calibration d'origine : lot de traceur, température et pH de l'eau, turbidité, teneur en chlore, etc.

III L'EQUIPEMENT DE MESURE

L'équipement de mesure est constitué de deux appareils :

- le doseur à augets, installé sur le site d'injection,
- le fluorimètre de terrain, placé dans le cours d'eau à une distance assurant un mélange parfait du traceur.

III.1 DOSEUR A AUGETS

Le doseur à augets (Fig. 1) est un dispositif entièrement mécanique, fonctionnant sous l'effet du poids de la solution d'injection. Il est alimenté par un réservoir contenant la solution de traceur à injecter. Le réservoir (capacité de 2 L dans cette application) est placé sur l'enceinte de protection du doseur (Fig. 2), de façon à ce que le liquide puisse s'écouler par gravité. Pour assurer un débit constant, donc une périodicité régulière de l'injection, ce réservoir est un vase de Mariotte. Un tuyau souple amène la solution au centre du dispositif, d'où elle s'écoule dans l'un des augets. Un robinet permet de régler le débit.

Le liquide remplit l'auget qui, lorsqu'il est plein, bascule et se vide instantanément dans le collecteur incliné de l'enceinte de protection. L'écoulement se fait par un perçage axial muni d'un tuyau souple, qui évacue le liquide dans le cours d'eau. C'est ensuite l'auget opposé qui se remplit et ainsi de suite. Le volume de liquide qui déclenche le basculement peut être ajusté par des butées réglables placées sous les augets. La présente réalisation autorise un volume maximum de 100 à 110 mL de solution par auget.

L'enceinte en plexi assure une protection efficace contre le vent, empêchant un basculement prématuré. La mise de niveau est nécessaire pour assurer la symétrie du mécanisme. Il est difficile d'éviter une légère dissymétrie des volumes de gauche et de droite. C'est toutefois sans conséquence sur la précision des masses injectées, puisque le dispositif peut être calibré. Pour cela, il suffit d'intercepter les deux premières doses dans une éprouvette graduée. Il est probable que la présente réalisation serait trop légère (actuellement : 3 kg), donc instable, pour un usage sous une pluie d'orage ou un vent très fort. Dans ces conditions, nous suggérons simplement l'utilisation d'une enceinte de protection recouvrant le tout.

La principale source de variation de masse de traceur (ou de volume de solution) est causée par la vidange imparfaite des augets, du collecteur et du tuyau terminal, c'est-à-dire de toutes les parties en contact avec la solution. Sur la Fig. 2, on peut voir la solution résiduelle sur le fond de l'appareil. Une conséquence de cette vidange imparfaite, c'est que le premier cycle présente un léger déficit de masse. Il convient donc d'effectuer un ou deux cycles à vide, pour atteindre un régime stationnaire où les résidus de liquide restent plus ou moins constants. Cette phase s'effectue juste avant la calibration décrite plus haut. Une amélioration significative a été obtenue en déposant une pellicule hydrophobe sur les surfaces de contact (spray de silicone).

L'écoulement (parfois goutte à goutte, si l'intervalle d'injection est long) peut également causer un basculement précoce sous l'effet de l'impact d'une goutte. Nous évitons ce problème en prolongeant le tube terminal (aiguille de seringue) par un fil de laine au travers duquel la solution s'écoule sans à-coups.



Figure 1. Doseur à augets. La capacité d'un auget est de 100 à 110 ml.



Figure 2. Enceinte de protection contre le vent. Un vase de Mariotte délivre la solution de traceur avec un débit constant.

Pour quantifier la variabilité de la quantité de traceur, nous avons mesuré durant une journée les volumes de basculement successifs (Fig. 3). On constate que l'erreur commise sur la masse de traceur injecté (Tab. 1, 0.5%) ne contribue pas significativement à l'erreur absolue totale attribuée à la méthode globale de jaugeage (4%). Comme le principe moteur est l'équilibre des moments de force entre les deux augets, une variation temporelle de masse spécifique de la solution sous l'effet d'un changement de température peut influencer les volumes de liquide injectés. Par conséquent, il est judicieux de n'utiliser le doseur et la solution d'injection que lorsque leur température d'équilibre a été atteinte.

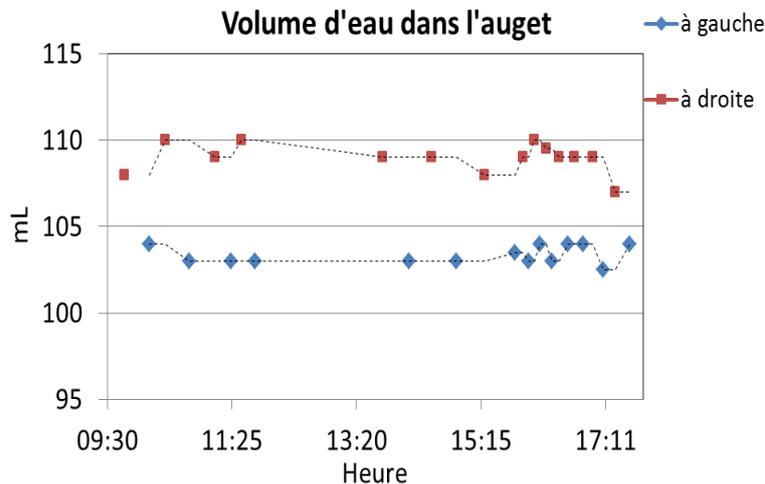


Figure 3. Mesure sur une journée des volumes de basculement du doseur à augets. L'alimentation était assurée par un vase de Mariotte. A la fin de l'essai, le débit a été volontairement augmenté.

	A gauche	A droite
Moyenne	103,4	109,0
Ecart type	0,5	0,8
Ecart moyen	0,5	0,6

Tableau 1. Volumes de basculement moyens du doseur à augets. Unité : mL

III.2 FLUORIMETRE DE TERRAIN

La mesure de concentration de traceur dans le cours d'eau est assurée par un fluorimètre de terrain de type GGUN-FL30 (Fig 4), développé à l'Université de Neuchâtel [Schnegg and Doerfliger, 1997] [Schnegg and Bossy, 2001] [Schnegg and Costa, 2003]. La sonde est posée sur le fond du cours d'eau ou suspendue dans le courant (Fig 5).



Figure 4. Sonde de fluorimètre de terrain GGUN-FL30. Diamètre 160mm



Figure 5. Immersion dans l'eau. Masse de la sonde : 7,5 kg

L'eau transite de façon naturelle à travers la cellule optique de la sonde (tube de quartz). La fluorescence du traceur est excitée périodiquement (intervalle de 2 secondes) par une source lumineuse à bande spectrale étroite et détectée à 90° au travers de filtres optiques convenablement sélectionnées. Le seuil de détection de l'uranine est voisin de 0,05 µg/L (ou ppb). Le niveau typique du bruit de fond de l'eau est de 0,5 µg/L.

Suivant les circonstances, d'autres substances fluorescentes peuvent être utilisées. La rhodamine WT possède une meilleure résistance au blanchiment par la lumière du soleil, mais à signal égal, il faut en utiliser 8 fois plus. Si la coloration du cours d'eau doit absolument être évitée, on peut aussi utiliser le naphthionate de Na.

La sonde est connectée à un boîtier de mesure par un câble. La concentration du traceur est enregistrée sur une carte mémoire flash. Elle peut également être lue sur un affichage à cristaux liquides. Cette lecture présente un grand intérêt, car elle permet de s'assurer que le passage du traceur est bien terminé avant l'arrivée du panache suivant.

IV MESURE TEST

Pour illustrer le fonctionnement du système, un jaugeage de quelques heures a été réalisé sur le canal de déviation de l'Areuse, à 1200 mètres de son embouchure dans le lac de Neuchâtel. Le fluorimètre a été déposé sur le lit cimenté du canal, à 50 cm du bord. Le site d'injection se trouvait à 430 mètres en amont. Sur

la moitié supérieure du trajet, la configuration accidentée du cours d'eau a assuré le bon mélange du traceur. A noter que l'installation d'une seconde sonde sur la rive opposée aurait permis de vérifier l'homogénéité de la concentration.

Le doseur à augets a été installé sur une rive du canal (Fig. 2). Il était alimenté par un vase de Mariotte contenant 2 litres de solution d'uranine à 10 g/L. Quelques cycles de remplissage/vidange ont été effectués à vide avant la mesure proprement dite, afin d'établir un régime stationnaire pour le liquide résiduel. Ces préliminaires ont également permis de vérifier la quantité de liquide délivrée par les deux augets (100 et 107 mL pour les augets de gauche et de droite). Il va de soi que la solution n'a pas été rejetée dans le cours d'eau, pour ne pas compromettre la future mesure de la ligne de base. Le débit du vase de Mariotte a été réglé à environ 10 mL/minute, de manière à assurer une injection toutes les 10 minutes (ce qui s'est avéré un peu trop rapide dans le cas présent).

Après la dernière injection de traceur, la sonde est immergée dans un seau contenant une solution à 100 µg/L préparée sur place avec l'eau du canal (4950 mL d'eau additionnée de 50 mL d'une solution à 10 mg/L préparée au laboratoire à partir de la solution d'injection). Cette opération permet d'enregistrer un palier de calibration à la suite des mesures de concentration. Une seule concentration de calibration suffit. En effet, bien que la réponse du fluorimètre soit légèrement non-linéaire (env. 10%), l'appareil est périodiquement calibré au laboratoire avec des solutions de 1 à 100 µg/L, ce qui permet d'en calculer la non-linéarité. Nous avons constaté que tous les points de calibration se trouvent sur une droite dans un graphique log-log des variables. L'exactitude de la transformation du signal (mV) en µg/L ne dépend plus que d'un facteur multiplicatif, celui que l'on obtient par cette simple calibration locale.

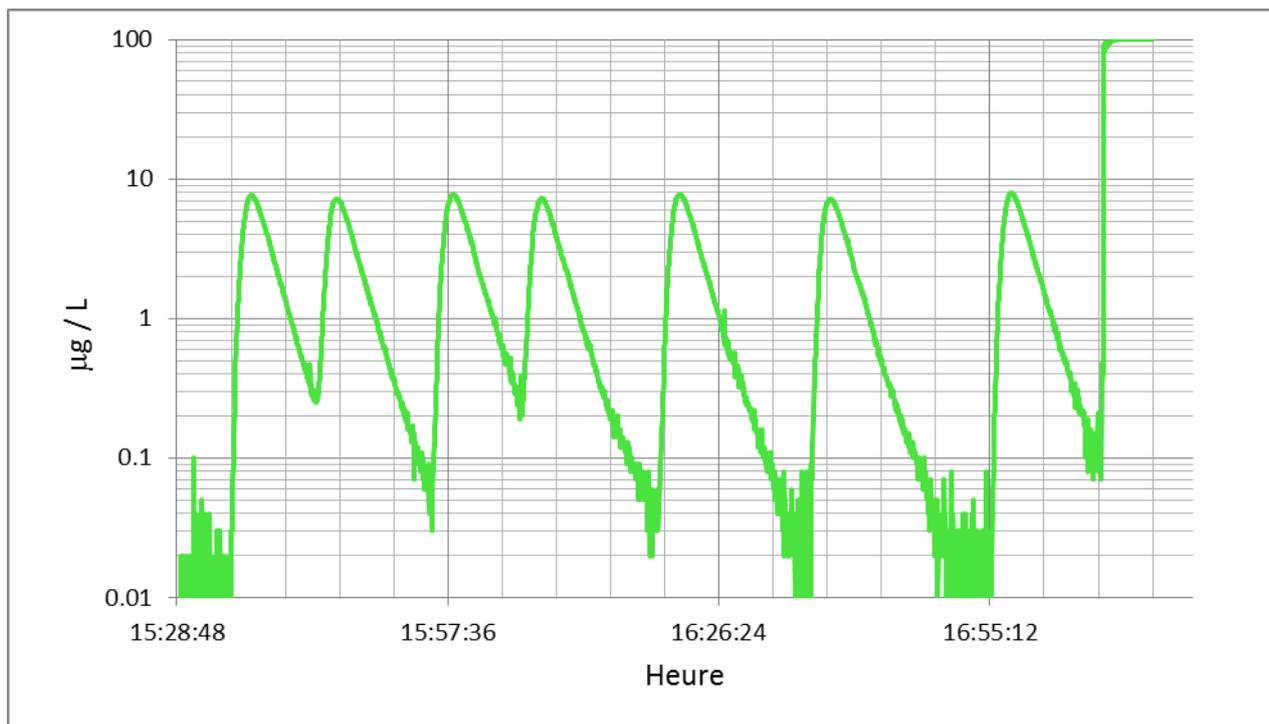


Figure 6. Concentration du traceur (uranine) en fonction du temps, mesurée 430 mètres en aval de l'injection. Le rapport signal/bruit obtenu avec 1 g d'uranine est voisin de 200 et assure une faible erreur de mesure. Le palier à 100 µg/L est obtenu en immergeant la sonde dans une solution de calibration préparée sur place avec l'eau du canal.

Le débit du cours d'eau en fonction du temps est calculé au moyen de (1) pour chaque pic, en tenant compte du volume de solution de chaque auget mesuré avant l'injection dans le canal. Les résultats sont résumés au Tab. 2. Il n'existe malheureusement pas de mesure parallèle locale de ce débit, mais nous avons vérifié que le débit de l'Areuse à l'embranchement du canal était resté constant pendant la durée du jaugeage (réf. : Débit de l'Areuse à Boudry, Service hydrologique national, 3003 Berne).

Passage du pic		Débit calculé [m ³ /s]	
à gauche	à droite	à gauche	à droite
-	15:36:44	-	0,737
15:45:48	15:58:06	0,710	0,716
16:07:36	16:22:12	0,706	0,707
16:38:10	16:57:36	0,708	0,705
écart type = 0,011			

Tableau 2. Résultat du jaugeage

Il est probable que la première mesure soit légèrement faussée vers le haut du fait que la diminution de concentration de traceur a été interrompue prématurément par l'arrivée du deuxième panache. Si on supprime ce premier résultat, l'écart type tombe à 0,004. Il est de même amplitude que celui de l'écart type des volumes injectés et reflète la difficulté à obtenir la vidange complète et régulière du doseur après chaque injection. Il confirme aussi que l'erreur relative d'un jaugeage dont on connaît exactement la masse injectée ne dépasse pas 0,1%. L'erreur absolue reste liée à celle des diverses opérations volumétriques nécessaires à la fabrication de la solution de calibration, soit 4%.

V CONCLUSIONS

L'association d'un doseur à augets et d'un fluorimètre de terrain permet de réaliser des séries rapides de mesures du débit de cours d'eau. Aucune intervention n'est nécessaire aussi longtemps qu'il reste de la solution dans le réservoir. Le présent exemple montre qu'une dose de 1g (100 mL) est suffisante pour obtenir un excellent rapport signal/bruit dans un cours d'eau dont le débit est inférieur à 1 m³/s. On peut donc estimer que le même dispositif pourrait être valablement utilisé pour jauger des cours d'eau plus puissants, probablement jusqu'à 10 m³/s, en injectant une solution d'uranine commerciale à 100 g/L. Cette concentration constitue également la valeur à ne pas dépasser lors d'une injection dans un cours d'eau afin de ne pas mettre en péril la survie des microorganismes voisins. Mais très rapidement, le pic de concentration atteint sa valeur d'équilibre entre 5 et 50 µg/L, dose bien inférieure aux normes en vigueur.

La concentration de la solution d'injection doit donc être limitée à 100 g/L. Il est connu par exemple que la rhodamine WT commerciale, vendue en solution à 20%, est sujette à une décantation sévère si le liquide est au repos. La variation de masse spécifique conduirait ici à une grande incertitude sur la masse effective de traceur injecté. Pour diminuer cette incertitude, il faudra tenter de réduire le résidu de liquide adhérent aux surfaces. Nous allons tester d'autres agents hydrophobes, parmi lesquels le spray au Teflon. Il serait probablement également judicieux d'augmenter l'angle du cône qui collecte la solution d'injection (actuellement 11°). Il n'y a pas de résidu notable dans le tuyau (silicone) qui conduit la solution dans l'eau.

Comme les concentrations mesurées par le fluorimètre sont enregistrées dans l'acquisiteur de données, il est parfaitement possible de retransmettre les résultats de chaque injection en temps réel sur internet par GPRS ou sur un téléphone mobile par SMS. Il s'agit uniquement de retransmettre l'intégrale de la concentration entre la première mesure et les retours successifs à la ligne de base, et non la totalité des mesures (1800 par heure), soit un volume de données très petit.

VI REFERENCES

Schnegg P.-A., Doerflinger N. (1997). *An inexpensive flow-through field fluorometer*. Proc. 6th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media, la Chaux-de-Fonds, 10-17 August : Vol. 2 : 47-50.

Schnegg P.-A., Bossy F. (2001). *Sonde for downhole measurement of water turbidity and dye tracer concentration*. In: Seiler & Wohnlich (Eds), *New Approaches Characterizing Groundwater Flow*. Swets & Zeitlinger Lisse : 795-799.

Schnegg P.-A., Costa R. (2003). *Tracer tests made easier with field fluorometer*. Bull. Hydrogeol. No 20, Editions Peter Lang : 89-91.

Schnegg P.-A., Perret C., Hauet A., Parrel D., Saisset G., Vignon P. (2011). *Stream gauging by dilution of fluorescent tracers and state of the art of the EDF hydroclimatological observation network*. Proc. 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon, 1-3 September : 435-438.

Perret C., Hauet A., Parrel D., Saisset G., Vignon P., Schnegg P.-A. (2012). *Le réseau d'observation hydroclimatologique de montagne d'EDF - état des lieux. Mesures de débit par dilution d'un traceur fluorescent. EDF hydrometeorological network in mountainous area, Overview. Focus on streamflow measurement by dilution of fluorescent*, La Houille Blanche, Vol. 3. DOI 10.1051/lhb/2012018.