Note technique

Jaugeage d'un cours d'eau par la méthode de la dilution d'un traceur fluorescent : Méthodologie pour la mise en œuvre des mesures (au laboratoire et sur le terrain)

Par Bruno ARFIB, Université Aix-Marseille

le 18 septembre 2013

Cette note technique présente le mode opératoire à mettre en œuvre pour réaliser une mesure de débit par la méthode de la dilution d'un traceur fluorescent en injection instantanée (également appelée méthode globale), à l'aide d'un fluorimètre de terrain GGUN et d'un ordinateur PC.

La note est divisée en 5 parties : 1) Rappel du principe de la méthode globale, 2) Préparation de la solution mère au laboratoire, 3) Mesures sur le terrain, 4) Traitement de données sur PC et calcul du débit, 5) Bibliographie.

1) Le principe de la méthode globale : dilution d'un traceur fluorescent en injection instantanée

La mesure ponctuelle du débit d'un cours d'eau (jaugeage) est ici réalisée par la méthode de la dilution d'un traceur fluorescent lors d'une injection instantanée. Cette méthode est largement décrite dans la littérature en hydrologie (Roque M. (1963), André et al. (1976), Charte Hydro (1998)). Elle consiste à injecter une masse de traceur fluorescent dans un cours d'eau, et mesurer la concentration de ce traceur sur une station de mesure aval. La station aval doit être située à une distance suffisante pour que la concentration soit uniforme sur toute la section de mesure (Figure 1)

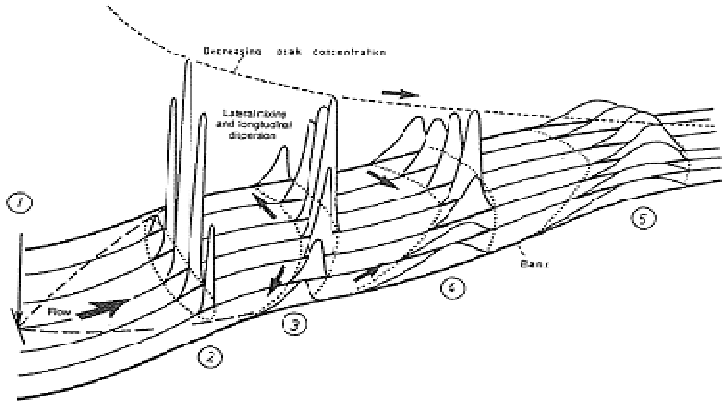


Fig. 1 Possible model of lateral and longitudinal mixing of an instantaneously injected tracer (after Hubbard et al., 1982. Kilpatrick et al. 1989).
1 = Injection point of the tracer, 2 = Tracer distribution immediately after injection, 3 = Tracer reaches banks of the channel, 4 = Backward directed flow from the banks to the center with successive lateral and longitudinal mixing, 5 = Lateral mixing is complete.

Figure 1 : Evolution de la concentration d'un traceur injecté dans un cours d'eau (point 1) sous l'effet de la dispersion latérale et longitudinale jusqu'à la distance de bon mélange (point 5) (extrait de Benischke et Harum, 1990)

Les jaugeages par dilution peuvent être mis en œuvre quels que soient les débits. Ils sont particulièrement adaptés aux mesures en crues, lorsque l'écoulement est très turbulent et qu'il serait dangereux qu'un opérateur descende dans le cours d'eau. La méthode du jaugeage par dilution d'un traceur fluorescent injecté de manière instantané est devenue une méthode de référence pour EDF (Schnegg et al. 2011), et sa mise en œuvre a pu être largement facilitée et fiabilisée par l'utilisation de fluorimètres de terrain nouvellement conçus (Schnegg 2003).

La méthode repose sur le principe de conservation de la masse entre le lieu d'injection et le lieu de mesure de passage du traceur. Le débit est alors décrit par l'équation (1)

$$Q = \frac{M}{\int_0^n C\ .dt} \qquad \text{éq. (1)}$$

avec Q : le débit de la rivière (m^3/s), M : la masse de traceur injectée (kg), C : la concentration (kg/m^3) en traceur dans la rivière au temps t (en seconde) variant de 0 à n, le temps n correspond au retour à la concentration initiale dans le cours d'eau (Figure 2).

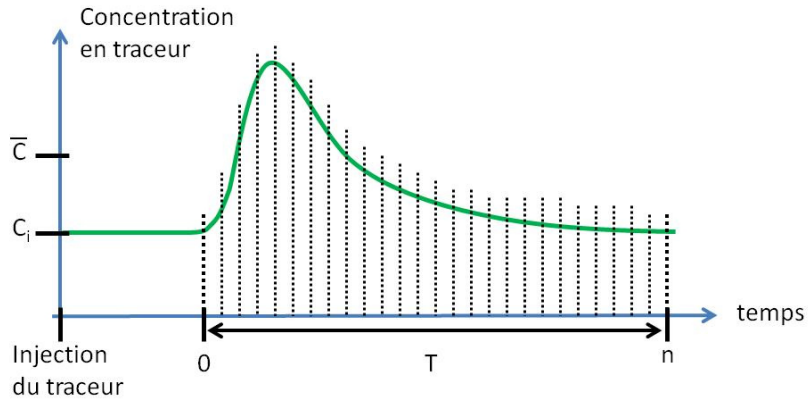


Figure 2 : Variation de la concentration en traceur sur la station de mesure aval

L'intégrale de la concentration au cours du temps sur le temps de passage du traceur (T) représente la concentration moyenne ($\bar{C}$) durant le temps T (éq. (2)).

$$\int_0^n C\ .dt = \bar{C}\ .T \qquad \text{éq. (2)}$$

L'équation (1) devient : $Q = \frac{M}{\bar{C}\ .T}$ éq. (3)

Dans le cas où la concentration en traceur dans le cours d'eau avant l'injection est non nulle, de valeur égale à C_i, l'équation (3) devient éq. (4) :

$$Q = \frac{M}{(\bar{C} - C_i)\ .T} \qquad \text{éq. (4)}$$

La valeur C_i est appelée généralement le "bruit de fond" (noté BF par la suite).

Dans le cas où le traceur est en solution, la masse de traceur injectée peut s'écrire (éq. (5)) :

$$M = Vol\ .C_0 \qquad \text{éq. (5)}$$

avec Vol le volume de traceur en solution injecté, C_0 la concentration du traceur en solution injecté.

L'équation (4) devient : $Q = \frac{Vol\ .C_0}{(\bar{C} - C_i)\ .T}$ éq (6)

La concentration en traceur fluorescent est mesurée sur le terrain par un fluorimètre GGUN (Albillia). Le fluorimètre mesure et enregistre le signal de fluorescence sous forme d'une tension, en milliVolts (mV). La tension (mV) est transformée en concentration (C en kg/m^3) par une relation établie expérimentalement à l'aide du traceur et du fluorimètre utilisés, donnée par l'équation (7) :

$$C = mV\ .\propto .\ C_0 \qquad \text{éq. (7)}$$

où α est le coefficient d'étalonnage en PPB/mV, et C_0 (kg/m^3) la concentration du traceur en solution injecté.

Le fluorimètre est ainsi étalonné. Le coefficient d'étalonnage est obtenu par mesure de la fluorescence d'une solution étalon, suivant l'équation (8) :

$$\propto = \frac{PPB_{étalon}}{mV_{étalon} - mV_{BFrivière}} \qquad \text{éq. (8)}$$

où $PPB_{étalon}$ est la concentration de la solution étalon, $mV_{étalon}$ est la valeur de la tension (en mV) de la solution étalon mesurée par le fluorimètre GGUN, et $mV_{BFrivière}$ est la valeur de la tension (en mV) du bruit de fond de la rivière mesurée par le fluorimètre GGUN avant la mesure du débit.

La tension (en mV) est calculée en tenant compte du bruit de fond de la rivière car la solution étalon est préparée sur le terrain à l'aide d'une solution mère concentrée (préparée au laboratoire, voir partie 2 suivante) et avec l'eau de la rivière.

On tire de l'équation (7) :

$$\bar{C} = \overline{mV}_{mesure} \,.\propto.\, C_0 \quad \text{et} \quad C_i = mV_{BFrivière} \,.\propto.\, C_0 \qquad \text{éq. (9)}$$

où $\overline{mV}_{mesure}$ est la tension moyenne enregistrée par le fluorimètre GGUN durant le temps T de passage du traceur fluorescent.

L'équation (6) devient :

$$Q = \frac{Vol \,.\, C_0}{(\overline{mV}_{mesure} - mV_{BFrivière}).\propto.\, C_0 \,.\, T} \qquad \text{éq. (10)}$$

2) Préparation de la solution mère au laboratoire, et solution étalon

La solution étalon est indispensable pour la réalisation de la mesure de débit. La solution étalon se prépare en deux temps :

(1) préparation d'une solution mère au laboratoire,

(2) dilution de la solution mère sur le terrain avec l'eau du cours d'eau pour obtenir la solution étalon.

La solution étalon devra avoir une concentration du même ordre de grandeur que la concentration maximale attendue lors des mesures sur le terrain pendant le passage du traceur.

Lorsque le traceur est en poudre, la solution étalon sera exprimée en PPB ou mg/l. Une valeur de 100 PPB est généralement bien adaptée.

Lorsque le traceur est déjà en solution, la solution étalon sera exprimée en fonction de la dilution de la concentration initiale (C_0.PPB), avec C_0 la concentration initiale en traceur fluorescent de la solution concentrée (obtenue généralement directement par le fabricant ou le revendeur du traceur). L'uranine (appelée communément fluorescéine) est par exemple vendue sous forme de solution concentrée, très pratique d'utilisation. Sa concentration est généralement autour de 300 g/l (une concentration d'environ 1/3 du produit en poudre). Dans ce cas, une solution étalon à 300 PPB préparée à l'aide du traceur liquide sera généralement bien adaptée. Si la concentration C_0 n'est pas connue avec exactitude, la mesure du débit peut être faite sans limitation étant donné que la valeur n'est pas utilisée dans les calculs, comme l'équation (10) le montre.

Astuce : *Le résultat du jaugeage sur le terrain est très sensible à la valeur de l'étalon. Pour avoir une idée préalable du résultat que vous trouverez lors de l'étalonnage sur le terrain, réalisez une solution étalon au laboratoire et mesurez son signal en mV avec le fluorimètre qui sera utilisé pour le jaugeage. Pour les expérimentateurs débutants, il est grandement conseillé de réaliser plusieurs solutions étalons au laboratoire et de comparer les résultats obtenus ; ceci vous permettra de tester la reproductibilité de votre étalonnage. Attention, sur le terrain, loin du confort du laboratoire, tout devient plus compliqué.*

Exemple de la préparation d'une solution mère à 30 000 PPB.C_0 pour obtenir une solution étalon à 300 PPB.C_0 sur le terrain

Le traceur utilisé est livré en solution concentrée, avec une concentration C_0 de l'ordre de 300mg/l de fluorescéine.

Matériel nécessaire :

Laboratoire : Fiole jaugée 1 litre, pipette 1 ml, pipette 10 ml, pipette ou fiole jaugée 50 ml, flacon 50 ml + gants et petit matériel. 2 litres d'eau à pH neutre non chlorée (idéalement de l'eau de source en bouteille car l'eau du robinet est chlorée, et l'eau distillée peut avoir un pH acide qui détruit la fluorescéine)

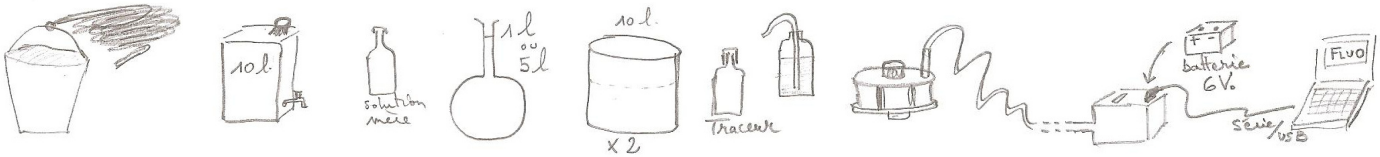
Terrain : Le flacon de 50 ml de solution mère, fiole jaugée de 1 litre (ou 5 litres), un récipient d'environ 10 litres pour tremper le fluorimètre GGUN dans 5 litres de solution étalon

Laboratoire	❶	C_1 = 30 ml de traceur liquide C_0 complétés à 1 litre. $C_1 = \frac{30.10^{-3}}{1} C_0 = 3.10^{-2} . C_0$
	❷	C_2 = 1 ml de la solution C_1 complété à 1 litre. $C_2 = \frac{1.10^{-3} .3.10^{-2}}{1} C_0 = 3.10^{-5} . C_0$ = 30 000 PPB . C_0 **: <u>Solution mère</u>** 50 ml de solution mère sont versés dans un flacon de verre ambré qui sera utilisé sur le terrain
Terrain	❸	La solution mère (flacon de 50 ml de concentration C_2) est diluée avec l'eau de la rivière sur le terrain C_3 = 50 ml de la solution C_2 complétés à 5 litres. $C_3 = \frac{50.10^{-3} .3.10^{-5}}{5} C_0 = 3.10^{-7} . C_0$ = 300 PPB . C_0 **: <u>Solution étalon</u>**

Remarque : pour obtenir une solution étalon à 100 PPB, reprendre les mêmes dilutions en utilisant uniquement 10 ml de traceur liquide à C_0 dans l'étape 1 au laboratoire.

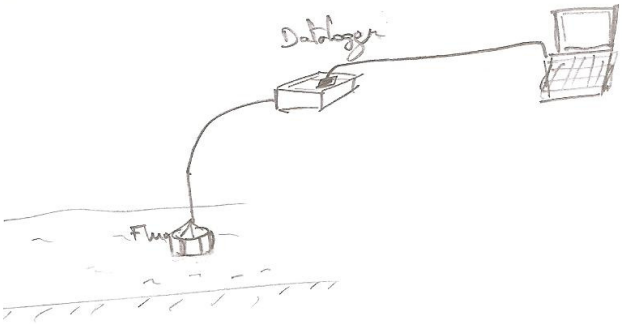
3) Mesures sur le terrain

Matériel nécessaire :



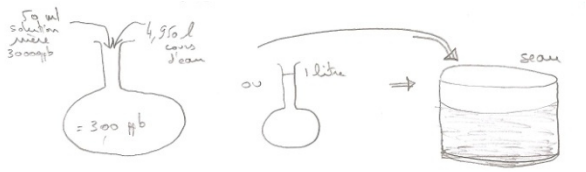
- *Prélèvement d'eau du cours d'eau* : un saut et un bidon pour stocker ou transporter l'eau du cours d'eau jusqu'au lieu d'injection ou de préparation de la solution étalon.
- *Solution étalon* : Le flacon de 50 ml de solution mère, fiole jaugée de 1 litre (ou 5 litres), un récipient d'environ 10 litres pour tremper le fluorimètre GGUN dans 5 litres de solution étalon,
- *Injection du traceur fluorescent* : Un flacon de quelques dizaines de millilitres de traceur en solution concentrée (attention, le traceur doit être issu du même lot que celui utilisé pour réaliser la solution mère). Un récipient pour diluer le traceur et faciliter ainsi l'injection instantanée (par exemple un saut de 10 litres). Une pipette souple pour bien rincer le flacon contenant le traceur.
- *Mesure de la concentration du traceur* : un fluorimètre GGUN (de préférence un modèle FL30) relié à son datalogger par un câble, un ordinateur PC avec le câble de liaison au datalogger, le logiciel FLUO.

❶ Plonger le fluorimètre dans le cours d'eau pour la mise en température.



❷Préparation de la solution étalon

Exemple : solution étalon à 300 PPB.C_0 :
50 ml de la solution C_2 (=30000PPB.C_0) complétés à 5 litres avec l'eau du cours d'eau
Attention, soyez minutieux, le résultat final du jaugeage est très sensible à la valeur de l'étalon.



❸ Brancher le datalogger du fluorimètre sur le PC.
* Dans le dossier où se trouve le logiciel Fluo : Ouvrir le fichier Calibrat.dat : serial port #9? , dernière ligne = 0 (with datalogger)
*

sur le PC	Lancer Fluo (version 27.2) ➔	conductimeter = NO sampling : 0 0 2 (=2 secondes) cocher 1 traceur (uranine) en haut et pas de turbidité
	Cliquer " New Acquisition "	
sur Datalogger	SR = 0 Interrupteur du datalogger ON	

➔Sur le PC les données apparaissent (éventuellement il remet à l'heure : OK)

❹ - **Plonger le fluorimètre** (après l'avoir essuyé) **dans le seau avec la solution étalon**
- Une fois les mV stabilisés à la valeur de la solution étalon, **plonger le fluo dans la rivière sans arrêter l'enregistrement**.

❺ Injecter le traceur en amont. Pour plus de commodité, préparer la dose de traceur dans un flacon de grande capacité (par exemple un flacon de 1 litre pour une dose de 10 ml) qu'il suffira de remplir d'eau sur le terrain avant l'injection.

❻ Regarder passer le traceur à l'aide de la courbe qui s'affiche sur le PC.
Arrêter l'enregistrement lorsque les mV sont revenus à la valeur initiale (arrêt dans le logiciel Fluo puis interrupteur OFF sur le Datalogger)

❼ Dans le gestionnaire de fichier du PC, faire une copie et renommer le fichier .mv qui vient d'être créé.

4) Traitement de données sur PC et calcul du débit

Logiciel Fluo (version 27.2)

1- Modifier le fichier disc.f

- remplir les données invariables du site de mesure : station, site…
- remplir les données variables : traceur, masse volumique (en réalité mettre la densité) toujours égale à 1 (même si le traceur en solution n'a pas une densité de 1)

2- Ouvrir Fluo.exe

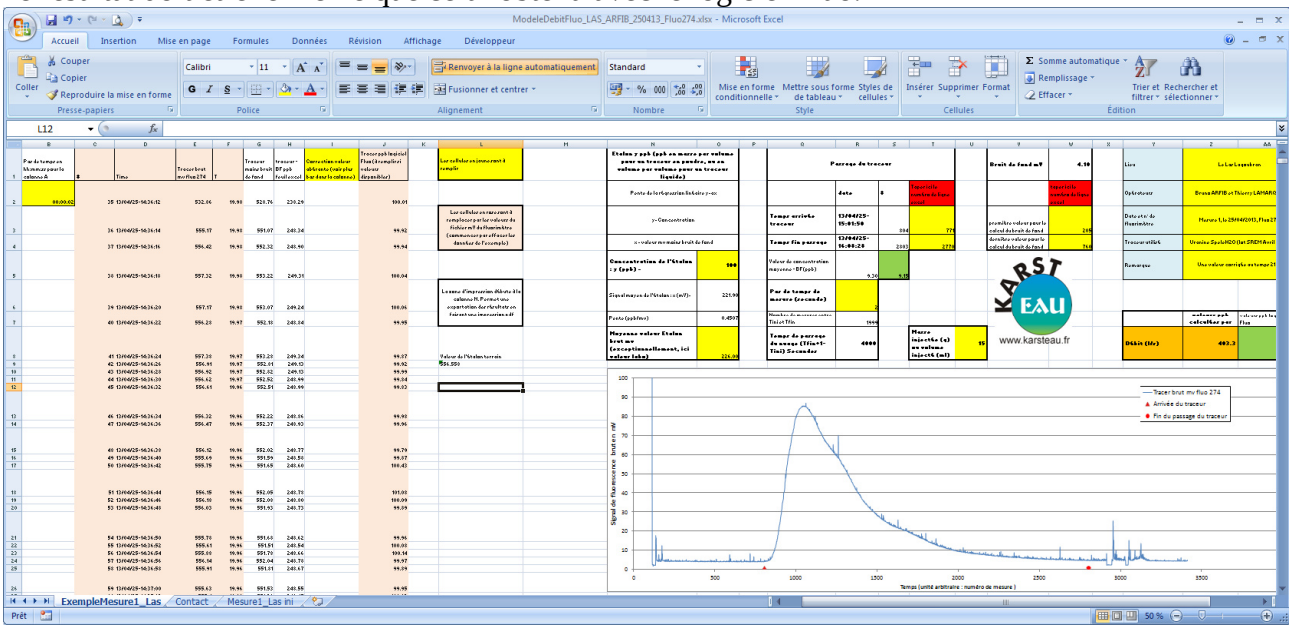
- Process mv ➔ ouvrir le fichier .mv du jaugeage
- Remplir les cases en haut de l'écran (nom, date…)
- Concentration de la solution étalon en PPB (par exemple 300, en utilisant les fenêtres dilutions)
- Masse ou volume du traceur (pour un traceur en solution rentrer directement le volume, à condition que la solution étalon ait été faite également en volume avec le traceur liquide)
- Heure d'injection (pour le calcul du temps de transit du traceur)
- Positionner les pointeurs noir et bleu :
  - ❶ : aux extrémités du segment de courbe :
    - 1.1 – Bruit de fond avant le passage du traceur, puis cliquer Action – Bruit de Fond – OK
    - 1.2 – Calibration, puis cliquer Action – Calibration – OK
  - ❷ : au départ et à la fin de la courbe du traceur, puis cliquer Action – Débit

Le résultat du calcul du débit s'affiche.

- Exporter les résultats dans un fichier word en cliquant "Rapport".

Feuille Excel

Il est possible de faire les calculs sans le logiciel Fluo, à l'aide de la feuille excel (régression linéaire dans le calcul de la concentration). Les données mV sont copiées dans la feuille (cases en rose), puis les calculs réalisés en modifiant les numéros des cellules dans les formules (cases en jaune). Le résultat doit être le même que celui obtenu avec le logiciel Fluo.



5) Bibliographie.

Roque M. (1963) Hydrologie de Surface. ORSTOM. 431p.
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-11/02081.pdf

Charte Hydro (1998) Charte Qualité de l'Hydrométrie- Code de bonnes pratiques -
http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/Charte-fr.pdf

Benischke R. & Harum T. (1990) Determination of discharge rates in turbulent streams by salt tracer dilution applying a microcomputer system. Comparison with current meter measurements. IAHS Publ. no. 193, 8p.
http://iahs.info/redbooks/a193/iahs_193_0215.pdf

Andre Henri , Audinet Michel, Mazeran Georges, Richer Claude (1976) Hydrométrie pratique des cours d'eau. Eyrolles. 259p.

Schnegg Pierre-André, Perret Christian, Hauet Alexandre, Parrel Dominique, Saysset Gérard et Vignon Philippe (2011) Stream gauging by dilution of fluorescent tracers and state of the art of the EDF hydroclimatological observation network. 9th Conference on Limestone Hydrogeology, 1-3 Sept. 2011, Besançon, France

Schnegg P.-A. 2003., A new field fluorometer for multitracer tests and turbidity measurement applied to hydrogeological problems. Proceedings of the Eight International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro.

Rappel sur les unités

1 ppb = 10^{-9} kg/litre = 10^{-6} g/litre = 1 µg/litre = 10^{-3} mg/litre
1 ppm = 10^{-3} g/litre = 1 mg/litre
10^{-11} g/ml = 10^{-8} g/litre = 10 ng/litre = 10^{-2} µg/litre

---

Contact : Bruno ARFIB
Aix-Marseille Université
Centre Saint Charles - CEREGE
Case 67 - 3 Place Victor Hugo
13331 Marseille cedex 3
Tél 04 13 55 07 48
www.karsteau.fr