

Article

« La fluorimétrie appliquée à la mesure du débit en milieu torrentie »

A. Orand et M. Colon

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 6, n° 2, 1993, p. 195-209.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705173ar>

DOI: 10.7202/705173ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

La fluorimétrie appliquée à la mesure du débit en milieu torrentiel

Use of fluorometric techniques
for streamflow measurements
in turbulent mountain streams

A. ORAND¹, M. COLON

Reçu le 23 juin 1992, accepté pour publication le 9 février 1993*.

SUMMARY

Though the use of tracers for water discharge measurements is not a new concept. Measurements with current-meters are easier and commonly used. Current-meters are however difficult to apply, especially in torrential regimes. To measure water discharge in mountain watersheds, we have developed an integrated device using rhodamine-wt as a tracer. The rhodamine-wt is nontoxic at the levels employed, has low sorption tendencies, and its determination of low concentrations (0.01 ppb) can be done with fluorometric techniques.

Fluorescence intensity decreases with increasing temperature and can be formulated, according to Feuerstein and Selleck (1963) as :

$$F_s = F_t \cdot e^{n(t-t_1)}, \text{ where } n = 10((\log F_s - \log F_t)/(t_1 - t))$$

In the laboratory, in order to determine the constant n for rhodamine-wt we worked with three solutions of rhodamine-wt (0.115, 0.23 and 0.46 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) with increasing temperature from 5 to 17.5 °C. Thus we found :

$$n = -0.024 \cdot \text{°C}^{-1}.$$

In the same way, we established the relationship between concentration and fluorescence. For rhodamine concentrations between 0 and 1 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ and concentration of suspended matter between 0 and 2 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ this relation is :

$$C \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1} = 0.0047 \times F^{1.0049}$$

Rhodamine-wt has low sorption tendencies, nevertheless we measured the attenuation effect due to the presence of suspended matter in the pumped water. In the range of 0.2 to 2 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ of suspended matter (diameter < 200 μm), with rhodamine-wt concentrations of less than 0.3 $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, we found the water discharge was overestimated of 6.4 % at most.

1. Institut de limnologie, 75, avenue de Corzent, BP 511, 74203 Thonon-les-Bains cedex, tél. : 50.26.78.00.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 21 décembre 1993.

In the field, we have organized a continuous survey of tracer concentrations in the river using the fluorometer with a continuous-flow attachment. The fluorescence signal was recorded using a plotter and a computer. When all the dye has passed through the sampling site, the operator starts the automatic calculation process of the mean concentration and the transit time of the dye to obtain finally the water discharge.

In this way, the total recovery method enables us to measure water discharge several times during a flood and to obtain easily and quickly the stage-discharge relation even for flood crest. This device has been applied on various rivers in the French part of the lake Geneva watershed, for a large range of water discharges from $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ to $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Key-words : *fluorometric analysis, fluorescent tracer, water discharge measurement.*

RÉSUMÉ

L'utilisation de traceurs pour la mesure des débits n'est pas un concept nouveau. Néanmoins les applications pratiques sont peu répandues, les méthodes au moulinet étant préférées, dans la plupart des cas, bien qu'elles s'avèrent souvent de mise en œuvre difficile, surtout en régime torrentiel. C'est dans le cadre particulier d'études des transferts de pollution dans des bassins versants montagnards, que nous avons été amené à développer un dispositif de mesure intégré des débits basé sur des traçages à la rhodamine.

Nous avons choisi la rhodamine wt pour son innocuité vis-à-vis de l'environnement et sa faible affinité pour les matières en suspension (MES).

Un fluorimètre équipé d'une cuve à circulation, placé près de la rivière, permet de suivre en continu et in situ le signal de fluorescence. La mesure de la fluorescence permet de définir la concentration moyenne et le temps de passage du nuage et par conséquent le débit $Q = M / (C_m \cdot t)$.

La précision de la méthode dépend du soin avec lequel l'étalonnage au laboratoire a été effectué.

On définit tout d'abord la constante spécifique du colorant en faisant varier température et concentration de rhodamine wt dans plusieurs solutions étalons. La constante de la rhodamine a été évaluée à :

$$n = -0.024 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

et la fluorescence ramenée à $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ à :

$$F_s = F_{t,0}^{-0.024(t-10)}$$

La relation entre concentration et fluorescence est :

$$C_{\mu\text{g. l}^{-1}} = 0.0047 F^{1.0049}$$

La présence de matières en suspension (MES) a pour effet de diminuer la fluorescence du colorant. Mesurée dans des solutions d'eau, de rhodamine wt (0 à $0.3 \mu\text{g. l}^{-1}$) et de MES (0 à 2 g. l^{-1}), la fluorescence de la rhodamine wt, pour les conditions extrêmes, est sous estimée de 6% .

La méthode de mesure des débits par coloration à la rhodamine wt a été appliquée à quelques rivières du Chablais (bassin versant du Léman) et, en particulier, a permis de définir la relation hauteur-débit de la Dranse au pont de Vongy.

Mots clés : *débitmétrie, rivières, fluorimétrie, traceurs fluorescents.*

1 - INTRODUCTION

Les techniques de mesure des débits liquides en fleuves et rivières à cours relativement lent, sont généralement fiables et, en principe, ne présentent pas de grandes difficultés (BOYER, 1964 ; Service Hydrologique National, 1983 ; REMENIERAS, 1972 ; ROCHE, 1962). Il en est tout autrement en cours d'eau à régime torrentiel. En effet, les méthodes de mesure basées sur l'exploration du champ des vitesses par moulinets ou saumons qui sont idéales dans les fleuves ou les rivières à pentes faibles, sont impossibles à mettre en œuvre dans les rivières à caractère torrentiel où les vitesses peuvent atteindre plusieurs mètres à la seconde. En outre, la rivière en crue peut transporter des troncs et rouler des galets qui mettent en péril le matériel de mesure lequel se déplace sur plusieurs mètres et ne donne pas une mesure précise et ponctuelle de la vitesse. Enfin, le temps d'exploration du champ des vitesses dans toute la section mouillée excède souvent l'heure, durée suffisante pour que le débit évolue dans de grandes proportions. Il est pourtant indispensable, notamment dans le cas d'études de pollution diffuse, de connaître avec une précision suffisante les débits liquides de crue (CIPEL, 1988).

Pour obtenir, dans de telles conditions et dans des délais acceptables, la relation hauteur-débit de rivières de montagne, ainsi que les débits de crue, nous avons perfectionné la méthode de mesure des débits par coloration (ANDRE, 1969 ; COBB *et al.*, 1965 ; DUMAS, 1952, LION *et al.*, 1976) en intégrant en différents points de la chaîne de mesure des améliorations qui portent sur :

- le choix d'un colorant fluorescent adapté,
- le suivi en continu et *in situ* du colorant,
- le calcul du débit sur le site de mesure.

2 - MISE AU POINT DE LA MESURE DU DÉBIT

2.1 Principe de la méthode « globale » ou par intégration

Une quantité connue de colorant est déversée dans la rivière ; après homogénéisation du mélange, on mesure, en aval, les concentrations du colorant pendant toute la durée de passage du nuage. Le débit est déterminé en appliquant la relation qui lie la masse de colorant déversée à la masse de colorant mesurée dans le nuage.

$$M = C_m \times t \times Q \quad \text{d'où} \quad Q = M / (C_m \times t)$$

M masse de colorant injecté

C_m concentration moyenne du nuage

t temps de passage du nuage

Déterminer la masse de colorant dans le nuage avec précision conduit à mesurer des concentrations très faibles. Cette difficulté est levée si l'on utilise

un colorant fluorescent en raison de la grande sensibilité de la méthode de mesure de la fluorescence (10^{-2} ppb).

2.2 Choix d'un colorant fluorescent

Notre choix s'est porté sur la rhodamine wt pour son innocuité vis-à-vis de l'environnement et sa faible affinité pour les matières en suspension (MES).

– La Foods and Drugs Administration admet une limite d'ingestion journalière de 0.75 mg pour les produits pharmaceutiques. Donaldson (1971) a démontré que la rhodamine wt peut, sans effet contraire, être injectée en intraveineuses chez le rat pour déterminer des temps de circulation du sang.

– Le Public Health Service donne comme limite supérieure une concentration de $370 \mu\text{g. l}^{-1}$ dans les eaux souterraines, de rivière ou de lac. A cette concentration l'eau est fortement colorée en rouge. Rappelons qu'à la concentration de $10 \mu\text{g. l}^{-1}$ la rhodamine est détectable visuellement dans un réservoir ou un grand volume d'eau.

– Par fluorescence, on peut détecter la rhodamine en dessous d'une concentration de $0.1 \mu\text{g. l}^{-1}$, donc loin des concentrations ci-dessus. De ce fait, les quantités à mettre en œuvre sont faibles et il suffit de 20 à 30 g de colorant pour mesurer un débit de $200 \text{ m}^3. \text{s}^{-1}$.

Par ailleurs, il y a peu ou pas de fixation du colorant sur les particules en suspension, surtout pour des trajets courts (FEUERSTEIN *et al.*, 1993 ; WATT, 1965). Cependant les matières en suspension contenue dans l'effluent sont une gêne pour la mesure car elles conduisent à des pertes de fluorescence du traceur par atténuation du signal lui même. Nous verrons quelle est l'importance de cette atténuation du signal et de quelle manière nous proposons de la prendre en compte.

2.3 Suivi en continu de la fluorescence

Généralement, pour déterminer la concentration en colorant tout au long du passage du nuage, il suffit de prélever des échantillons d'eau de rivière à intervalle de temps brefs, puis d'analyser au laboratoire ces différents échantillons, de tracer ensuite la courbe de variation des concentrations en fonction du temps. Le graphique obtenu donne le temps de passage du nuage et, après intégration, la concentration moyenne. Ces différentes opérations ne vont pas dans le sens indiqué plus haut, à savoir la rapidité de la mesure et le dépouillement sur place des débits. En outre, cette façon de procéder, en aveugle, ne permet pas d'ajuster les prélèvements aux temps de passage précis du nuage.

Une telle optimisation des mesures est obtenue en plaçant le fluorimètre au plus près de la rivière en réalisant la mesure en continu de la concentration laquelle est saisie par un microordinateur qui se charge des calculs intermédiaires. Lorsque l'opérateur juge que les concentrations de rhodamine sont revenues à un niveau négligeable, le micro-ordinateur effectue les conversions des concentrations exprimées en pourcent en concentrations en $\mu\text{g. l}^{-1}$, calcule la concentration moyenne du nuage et détermine le débit.

Tableau 1 Matériel nécessaire à la mesure *in situ* et à l'étalonnage.**Table 1** *Field and laboratory devices used to calibrate and to perform in situ measurements.*

Matériel de mesure
<ul style="list-style-type: none"> • Groupe électrogène d'une puissance de 1 000 W délivrant un courant alternatif 220 volts 50 Hz • Pompe électrique immergée d'un débit de 1 m³.h⁻¹ • Fluorimètre Turner III comprenant : <ul style="list-style-type: none"> - filtre primaire d'excitation à 546 nm - filtre secondaire d'émission à 590 nm - filtre secondaire « passe-haut » éliminant le rayonnement d'excitation au-dessous de 570 nm - lampe UV en U « general purpose » de longueur d'onde principale d'émission à 360 nm - cellule de mesure à débit continu de 19 mm de diamètre - porte-cellule avec prisme d'amplification • Enregistreur 2 voies • Saisie de données • Micro-ordinateur portatif et logiciel de dépouillement des données
Matériel d'étalonnage
<ul style="list-style-type: none"> • Groupe de régulation thermique et sonde de température • Agitateur magnétique • Petite pompe de circulation

2.4 Étalonnage

C'est la partie la plus délicate de la mesure et celle dont dépend pour une large part la précision avec laquelle les débits seront obtenus.

L'industrie du colorant propose deux types de produit : Des solutions de rhodamine wt de concentrations voisines de 220 g. l⁻¹ et des solutions étalons dont la concentration est parfaitement connue. En procédant par dilutions successives, on prépare des solutions de concentrations comprises entre 0 et 1 µg. l⁻¹, valeurs que l'on obtient lors des mesures de débit. Ces solutions maintenues à température constante circulent successivement dans le dispositif en continu du fluorimètre.

2.4.1 Constante spécifique du colorant

La fluorescence de la rhodamine diminue avec l'augmentation de la température et la loi qui lie ces deux paramètres est de la forme :

$$F_s = F_t \times e^{n(t_s - t)} \quad (1)$$

avec F_s fluorescence à la température standard

F_t fluorescence à la température t en pour-cent

t température de la solution en °C.

n constante caractéristique de la rhodamine wt

t_s température standard en °C (FEUERSTEIN et SELLECK 1963).

de (1) on tire :

$$n = 10((\log F_s - \log F_t) / (t_s - t)) \quad (2)$$

Chaque température de mesure étant choisie comme température standard, il est possible d'obtenir pour l'ensemble des points d'étalonnage et pour chacune des concentrations la valeur de la constante pour la rhodamine wt.

Pour les concentrations de colorant de 0.115, 0.23 et 0.46 $\mu\text{g. l}^{-1}$ et pour les températures variant de 5°C à 17.5 °C nous avons établi à partir des mesures expérimentales un tableau de valeurs de la constante (tableau 2), d'où il ressort : $n = -0.024. \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et la loi générale (1) devient :

$$F_s = F_t \times e^{-0.024 (t_s - t)} \quad (3)$$

Tableau 2 Valeurs de la constante n.

Table 2 Values of constant coefficient n.

Température °C	Concentration de rhodamine-wt ($\mu\text{g. l}^{-1}$)			
	0.115	0.230	0.460	Moyenne
5.0	-0.02401	-0.02349	-0.02318	-0.02356
7.5	-0.02543	-0.02392	-0.02321	-0.02419
10.0	-0.02464	-0.02438	-0.02412	-0.02438
12.5	-0.02456	-0.02475	-0.02302	-0.02411
15.0	-0.02406	-0.02476	-0.02317	-0.02399
17.5	-0.02539	-0.02410	-0.02388	-0.02446
Moyenne	-0.02468	-0.02423	-0.02343	-0.02412

2.4.2 Relation entre concentration et fluorescence

La relation liant concentration et fluorescence (fig. 1) a été établie pour des quantités de MES variant, comme lors des crues, de 0 à 2 g. l^{-1} . Les valeurs de concentrations de rhodamine ont été ramenées à la température de 10 °C que nous avons choisie comme température de référence. Comme nous l'avons signalé plus haut, la présence de MES amène une certaine variabilité dans les résultats. Pour les concentrations élevées de rhodamine, cet effet est maximum et les écarts à la courbe moyenne sont d'environ 10 %.

Pour l'équipement utilisé, pour des concentrations de rhodamine situées entre 0 et 1 $\mu\text{g. l}^{-1}$ et pour des teneurs en MES entre 0 et 2 g. l^{-1} , l'équation de la courbe d'étalonnage $C = a \times F^b$ (FEUERSTEIN *et al.*, 1963) est la suivante :

$$C \mu\text{g. l}^{-1} = 0.0047 F^{1.0049}$$

2.4.3 Atténuation du signal

Les matières en suspension perturbent le signal de fluorescence dû à la rhodamine de 3 manières :

- par fixation de la rhodamine wt sur le sédiment,

- par effet Tyndall du rayon incident sur les particules en suspension ce qui augmente le flux lumineux à la sortie de la cuve de mesure,
- par effet de cache des particules en suspension qui occultent une partie du flux lumineux de sortie de la cuve.

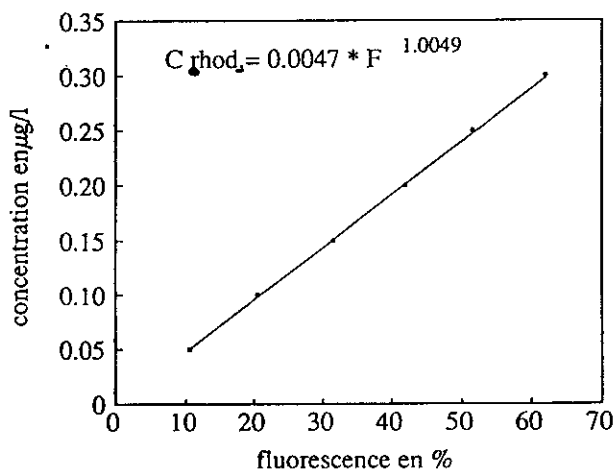


Figure 1 Relation entre la concentration et la fluorescence de solutions d'eau et de rhodamine-wt.

Relationship between concentration and fluorescence of rhodamine-wt at various levels of dilution.

La bibliographie (COBB, 1965 ; FEUERSTEIN *et al.*, 1963 ; LALLEMAND, 1964 ; TALBOT *et al.*, 1968 ; WATT, 1965) nous apprend que par rapport à la rhodamine B, la fixation de la rhodamine wt sur le sédiment est faible et peut être considérée comme négligeable si la quantité de MES reste en deçà de 1 g. l^{-1} . Pour neutraliser l'effet Tyndall il suffit de régler le zéro du fluorimètre sur la solution brute. Il reste donc à tenir compte de l'effet de cache des particules qui gênent la transmission du flux lumineux émergent.

Nous avons conduit un ensemble d'essais de laboratoire pour étalonner cet effet de cache (*fig. 2*) en partant des données suivantes :

- concentrations en MES de 0 à 2 g. l^{-1} (particules inférieures à $200 \mu\text{m}$ de diamètre) ; cette gamme de 0 à 2 g. l^{-1} de particules inférieures à $200 \mu\text{m}$ de diamètre nous a semblé correspondre à la gamme de valeurs rencontrées dans les eaux naturelles en période de crue ;

- granulométrie du sédiment inférieure à $200 \mu\text{m}$, cette limite correspond à celle observée lors de nos mesures avec le matériel que nous utilisons (pompe de faible puissance, tuyau de refoulement de 5 à 6 m de long, dénivellé entre le niveau de la rivière et la cuve du fluorimètre de l'ordre de 2 à 3 m) ;

- concentration de rhodamine de 0 à $0.3 \mu\text{g. l}^{-1}$, c'est dans cette gamme que se situe la concentration moyenne obtenue dans le nuage de colorant.

En outre, nous avons supposé que pendant le temps de passage du nuage de colorant, de 5 à 20 mn selon le débit, il n'y avait pas de variation notable de la concentration des MES.

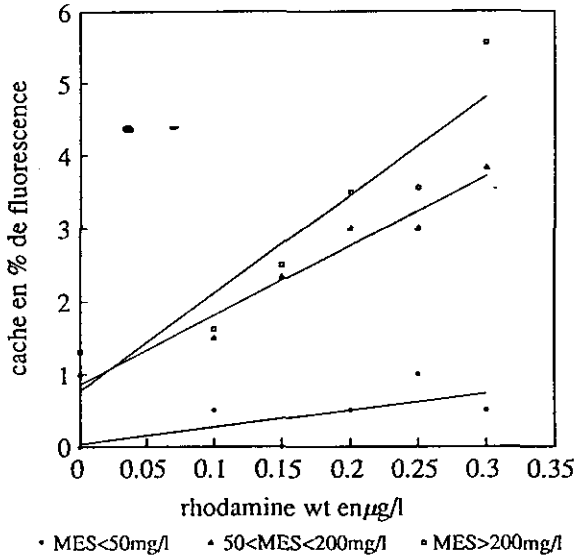


Figure 2 Effet de cache (en % de fluorescence) des particules en suspension sur la fluorescence de la rhodamine-wt. Les résultats ont été regroupés par classe de concentration des MES.

Effect of suspended matter on the fluorescence of rhodamine-wt (expressed as percentage of fluorescence). The results are grouped by concentration class for the suspended solids.

Nous avons procédé à des mesures de fluorescence sur 12 solutions de concentration en MES étalées entre 0.031 g. l^{-1} jusqu'à 1.928 g. l^{-1} (taille des particules inférieure à $200 \mu\text{m}$). Compte tenu de la similitude des résultats pour les concentrations en MES voisines, nous avons regroupé les résultats en 3 classes de concentrations en MES (tableau 3) :

- inférieure à 50 mg. l^{-1}
- de 50 à 200 mg. l^{-1}
- de 200 à $2\,000 \text{ mg. l}^{-1}$.

Aux conditions les plus défavorables, concentrations de MES supérieures à 200 mg. l^{-1} et concentration moyenne de rhodamine de $0.3 \mu\text{g. l}^{-1}$, la fluorescence de la rhodamine est sous estimée de 6 %.

Tableau 3 Fluorescence de la rhodamine-wt en fonction de la concentration en rhodamine et en matières en suspension.

Table 3 *Fluorescence of rhodamine-wt vs rhodamine concentration and suspended matter.*

Classe des concentrations en particules de taille < 200 μm	Concentration de rhodamine-wt ($\mu\text{g.l}^{-1}$)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
g.l^{-1}	Signal de fluorescence en %					
MES = 0.00	10.5	20.5	31.5	42.0	51.5	62.0
0.00 < MES < 0.05	10.5	20.0	31.5	41.5	50.5	61.5
0.05 < MES < 0.20	9.5	19.0	29.2	39.0	48.5	58.2
0.20 < MES < 2.00	9.2	18.9	29.0	38.5	47.9	56.4

2.5 Mise en œuvre et vérification de fiabilité

2.5.1 Procédure de terrain

Sur le terrain, après avoir respecté le délai de mise en température du matériel, on fait circuler l'eau de la rivière dans la cuve en continu et on procède au réglage du zéro de l'appareil.

On peut alors commencer les mesures de débit en injectant la solution de rhodamine wt en amont.

Une mesure de la concentration en MES sur un prélèvement d'eau à la sortie de la cellule de mesure du fluorimètre au moment du passage du nuage de rhodamine permet de corriger le cas échéant le signal de fluorescence enregistré.

L'enregistrement en continu du signal permet de se rendre compte de l'homogénéité du nuage de rhodamine diluée et lorsque la concentration est revenue au point de départ, on peut déclencher le calcul du débit par le micro ordinateur.

2.5.2 Contexte et site expérimental

Dans le cadre de la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman contre la pollution (CIPEL), les flux de matière en provenance du bassin versant lémanique sont évalués et, en particulier, celui de la Dranse. Cette mesure des flux est basée sur l'analyse de prélèvements en continu de l'eau de la rivière et sur l'enregistrement de la variation de la hauteur d'eau. Dans ces conditions, la précision de l'évaluation des flux repose, pour une bonne part, sur la précision avec laquelle est calculée la courbe de tarage de la rivière. Jusqu'en 1980, les mesures de débit qui établissent la loi $Q = f(H)$ n'ont pas dépassé $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, alors qu'annuellement en cinq ou six occasions ces valeurs de débit sont largement dépassées. Dès lors l'évaluation de la charge liquide dépend d'une courbe de tarage extrapolée.

C'est notamment pour lever cette imprécision que nous avons développé une technique de mesure permettant l'évaluation des débits supérieurs à $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il était souhaitable que cette technique soit de mise en œuvre rapide et que le dépouillement des résultats soit quasi immédiat pour permettre de procéder à plusieurs mesures de débit au cours d'une même crue.

2.5.3 Exemple de résultats et comparaison de mesures de débits

Pour la Dranse, le point d'injection et de mesure sont distant d'environ 4 km. Le point de mesure a été situé à l'aval du pont de Vongy (fig. 3) sur la rive droite, afin de bénéficier de la turbulence créée par les piles du pont pour améliorer l'homogénéité du mélange.

Un exemple d'enregistrement de la variation de la fluorescence de la solution en fonction du temps à la section de mesure (fig. 4) atteste de la bonne homogénéité du mélange. Les fluctuations instantanées sont faibles, de l'ordre de 0.2 % de fluorescence. Le temps pour parvenir à la concentration maximum est de l'ordre de 1/5 du temps total du passage du nuage.

Les mesures de débit que nous avons effectuées sur la Dranse à Vongy (tableau 4), en présence ou non de matières en suspension sont reproductibles et nous n'avons pas rencontré de points de tarage aberrants (fig. 5) dans la gamme de débits de 30 à $280 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que nous avons mesurés.

Tableau 4 Jaugeages par fluorimétrie sur la Dranse au pont de Vongy.

Table 4 Stage and discharge measurements of river Dranse with fluorescent tracer.

Hcm	6.0	13.0	20.0	27.0	30.0	40.5	40.5	40.5	47.0	47.0
Qm ³ s ⁻¹	1.7	4.0	9.7	14.0	18.3	32.4	34.6	32.0	41.8	38.7

Hcm	47.0	63.5	64.0	83.0	86.0	126	127	136	136	137
Qm ³ s ⁻¹	42.3	76.3	80.7	127	136	248	248	244	260	285

Les mesures de débit ont été réalisées par coloration à la rhodamine wt. Pour les débits d'étiage nous avons pu procéder à un contrôle en effectuant deux mesures au micromoulinet. A une hauteur d'échelle de 34 cm nous avons obtenu un débit de $27.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et pour une hauteur de 6 cm le débit de $1.63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Il existe donc une bonne correspondance des deux types de mesure.

Sur le Foron, petite rivière du Chablais voisine de la Dranse, nous avons également procédé à des mesures au micromoulinet et par coloration à la rhodamine wt. Les résultats obtenus confirment cette coïncidence (tableau 5).

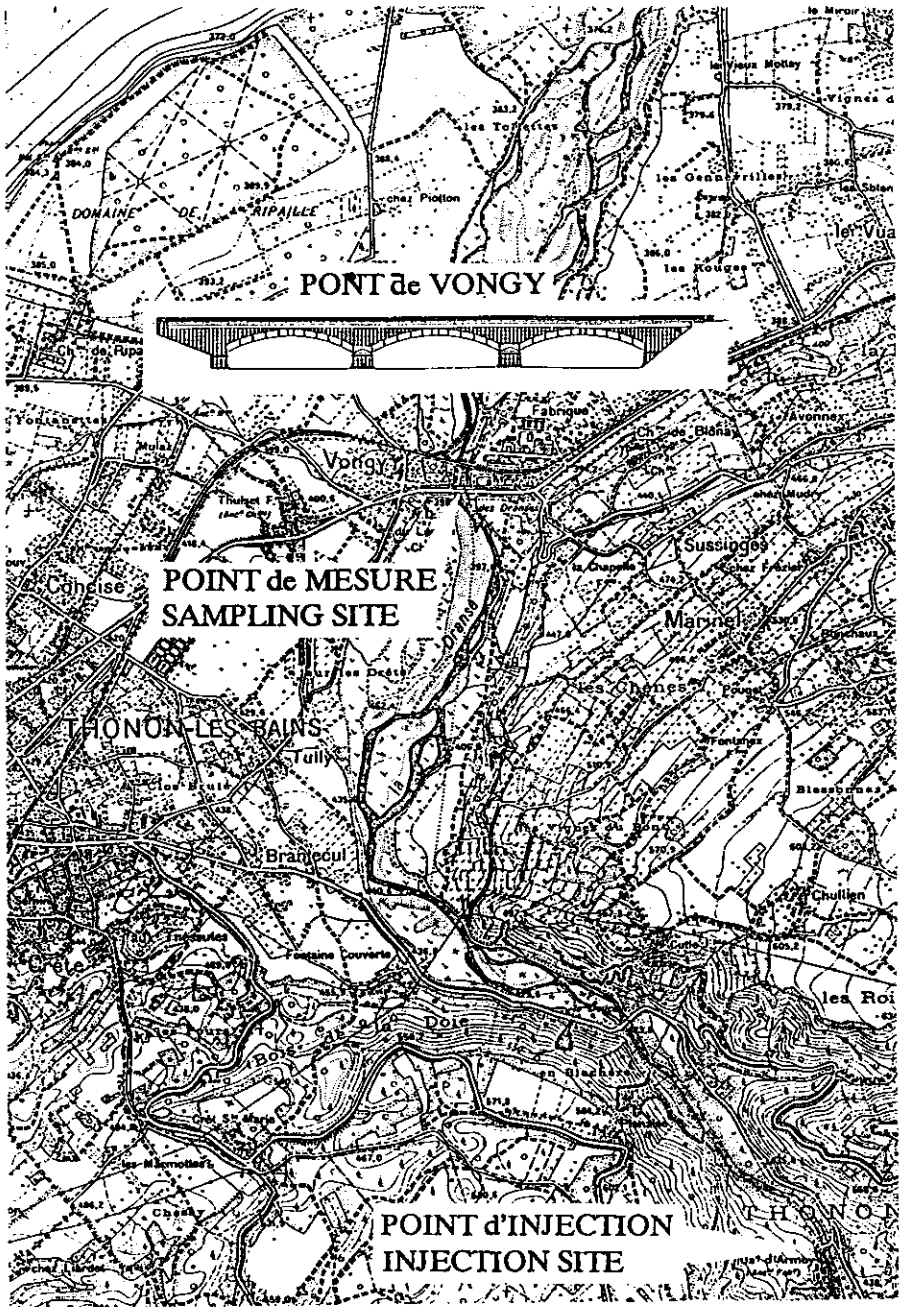


Figure 3 Partie inférieure du cours de la Dranse avec le point d'injection et la section de mesure au pont de Vongy.
Low part of river Dranse with injection and sampling sites indicated.

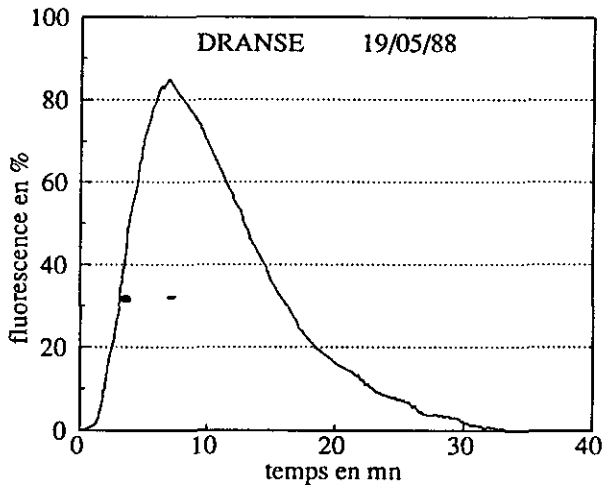


Figure 4 Variation de la fluorescence en fonction du temps.
 Hauteur d'échelle : 63.5 cm ; masse de rhodamine injectée : 20.7 g ;
 concentration moyenne du nuage : $0.146 \mu\text{g.l}^{-1}$; débit : $76.3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.
*Variation of fluorescence of dye versus time. Stage : 63.5 cm ; mass of
 tracer injected : 20.7 g ; mean concentration of tracer at the sampling
 site : $0.146 \mu\text{g.l}^{-1}$; water discharge : $76.3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.*

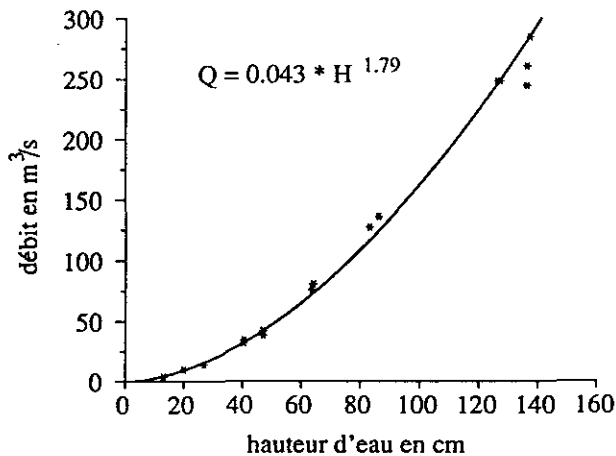


Figure 5 Courbe de tarage de la Dranse au pont de Vongy réalisée en 1988.
Stage-discharge relation for the river Dranse in 1988.

2.6 Précision de la mesure

La détermination du temps de passage du nuage à la section de mesure dépend du moment où l'opérateur estime que la concentration du colorant est revenue à zéro. La décroissance du signal est faible et la courbe se rapproche

de l'axe du temps de façon asymptotique. Sur un traçage nous avons déterminé le débit pour différentes positions du point de retour à zéro. L'erreur introduite par un doublement du temps de passage n'est que de 4 %.

Tableau 5 Mesure de débit au micro-moulinet et par coloration à la rhodamine-wt sur le Foron (HS).

Table 5 Comparison of discharge measurements with rotating meter and fluorescent tracer.

Date	Débit l.s ⁻¹	
	Moulinet	Rhodamine
30 avril 1990	446	451
18 mai 1990	190	226
	221	
22 mai 1990	262	261
	266	

L'erreur sur la mesure de la température de l'eau est de l'ordre du 1/10^e de degrés centigrades avec le matériel que nous utilisons (thermomètre au 1/10^e). Une erreur par excès de cet ordre induit une variation de 0.2 % par défaut du débit.

L'erreur sur le volume de rhodamine injectée mesuré à la multipette Eppendorf est pour le type utilisé de ± 0.3 %. Cela à comme conséquence une erreur sur le débit de 0.6 %. L'écart entre différentes mesures de surface de la courbe $C = f(t)$ effectuées au planimètre se traduit par une variation de débit de 1.5 %.

Enfin nous avons vu qu'en présence de MES, dans les conditions les plus défavorables (concentrations de MES > 200 mg. l⁻¹ et concentration moyenne du nuage de 0.3 μ g. l⁻¹), la fluorescence était sous estimée de 6 %. Cette sous estimation équivaut à une surestimation du débit de 6.4 %.

A ces différentes causes d'erreurs viennent s'ajouter celles dues à l'étalonnage. Dans les conditions normales d'utilisation de la méthode (débit de crue, mélange homogène, concentration de MES inférieure à 2 g. l⁻¹, ...), on peut donc estimer à 10 % l'erreur globale sur le débit.

3 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Moyennant un étalonnage des solutions de rhodamine wt et un étalonnage du mélange eau et mes, les mesures de débit par traçage ne sont pas d'une mise en œuvre difficile. Les résultats sont reproductibles et les comparaisons des mesures avec des méthodes mécaniques quand elles sont possibles, confirment bien la fiabilité. Les résultats répondent donc aux critères recher-

chés : simplicité de mise en œuvre, fiabilité et exploitation immédiate sur le terrain y compris dans les conditions naturelles difficiles. En outre, sous réserves d'étalonnage, le même équipement pourrait permettre de mesurer en continu, par néphélométrie, les concentrations de MES dans les cours d'eau.

REMERCIEMENTS

Cette étude a pu être menée à bien grâce à l'aide apportée par l'AIP « eau » Sciences du sol de l'INRA.

Je tiens à remercier tout particulièrement Mr J.M.Dorioz, chercheur à l'INRA de Thonon qui a investi beaucoup de son temps dans la correction et la critique de cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRE H. (1969). Méthode par traceurs utilisés en 1969 pour la mesure des débits liquides. *La Houille Blanche*, 5,535-9
- BOYER M.C. (1964). Streamflow measurement. sect. 15 in Handbook of applied hydrology. Ven Te Chow (éd).
- CIPEL (1988). Rapport de l'étude des pollutions d'origine diffuse dans le bassin lémanique. 119 p.
- COBB E.-D., BAILEY J.F. (1965). Measurement of discharge by dye dilution methods, surface waters techniques. *U.S. Geological Survey* : 1-14.
- Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, Division of environmental engineering and food protection, Policy statement on use of rhodamine B dye as a tracer in water flows study. (1966).
- DONALDSON D. (1971). On the toxic effects of several fluorescent dyes. United States Geological survey study.
- DUMAS H. (1952). La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau. *La Houille Blanche* : 690-701.
- DUMAS H. (1953). La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau. *La Houille Blanche* : 51-57.
- EINSTEIN H. (1964). A. River sedimentation. sect. 17-2 in Handbook of applied hydrology. Ven Te Chow (éd.).
- FEUERSTEIN D. L. and SELLECK R. E (1963). Fluorescent tracers for dispersion measurements. *J. Sanit. Eng. Div., Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, 89,1-21.
- Service hydrologique national (1983). Guide pour les jaugeages des cours d'eau. Office fédéral de la protection de l'environnement. Communication N° 4 Berne, 127 p.
- LALLEMAND A. (1964). Etude comparée de la fixation de la fluoescéine et de la rhodamine B par trois types de matériaux : craie, sable, mame. B.R.G.M., DS.64 - A26.
- LALLEMAND-BARRES A. (1984). Traceurs artificiels en hydrogéologie. BRGM. 66 p.
- LION Ph., GALEA G. (1976). Propositions d'aménagement du jaugeage chimique des débits des rivières. Méthode utilisant les colorants alimentaires. *La Houille Blanche*, 5.
- REMENIERAS G. (1972). Hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles Paris. 456 p.
- ROCHE M. (1962). Hydrologie de surface. Gauthier Villars Paris. 429 p.
- TALBOT J.W. and HENRY J.L. (1968). The adsorption of rhodamine-B on to materials carried in suspension by inshore waters. *J. Const. Inst. Explor. Mer*, 32, 7-16.
- WATT J. (1965). Development of the dye dilution method for measuring water yields from mountain watersheds. Master's thesis for Colorado State University, Fort Collins, Colorado.