



Fiche n°7 : Vérification du débit et de la vitesse par la méthode de traçage

1. PRINCIPE

La méthode de traçage permet de calculer le débit d'un écoulement indépendamment des mesurages de hauteur et de vitesse. Le débit ainsi calculé peut permettre de vérifier un débitmètre en place ou une mesure de vitesse d'écoulement.

Le principe du traçage par injection instantanée consiste à effectuer un bilan de masse: la masse de traceur injectée en amont d'un tronçon sur lequel on veut mesurer un débit Q doit être égale à la masse de traceur déterminée en aval, en mesurant la concentration $C(t)$ en traceur, après dilution dans l'écoulement et propagation dans le tronçon.

2. CRITÈRES DE CHOIX

2.1 Choix du traceur

En hydrologie urbaine, les traceurs chimiques ou colorés sont les plus utilisés.

Un traceur doit satisfaire les critères suivants :

- ne pas être naturellement présent dans l'écoulement (ou présent en faible et constante quantité : il faut donc déterminer le bruit de fond) ;
- se mélanger facilement à l'eau ;
- être stable durant la durée du traçage (la teneur en sel varie en temps de pluie) ;
- être mesurable par un capteur en temps réel (moins onéreux que les analyses avec prélèvements et surtout visualisation sur site des résultats) ;
- être d'un coût aussi faible que possible pour pouvoir être utilisé en grande quantité.

Tableau 1: comparaison des traceurs (source Bertrand-Krajewski et al., 2000)

	Rhodamine WT	Chlorure de lithium LiCl	Chlorure de sodium NaCl
Concentration usuelle des solutions mères	200 g/L	300 g/L	300 g/L
Concentration usuelle dans l'effluent (bruit de fond)	10 ⁻³ mg/L (-)	2 à 5 mg/L (1 à 5 µg/L)	50 mg/L (50 à 1000 mg/l)
Techniques de mesurages possibles (coût / précision)	Fluorimétrie en continu (moyen / grande)	Spectrométrie sur prélèvements (fort / moyenne)	Conductimétrie en continu (faible / moyenne)
Précautions	- adsorption sur MES - influence de la T° et des MES	- adsorption sur MES - attaque acide avant dosage	- linéarité jusqu'à 5,8 g/L - influence de la T° - bruit de fond

En tenant compte de tous les critères, deux traceurs apparaissent comme les plus appropriés :

- le chlorure de sodium NaCl pour le temps sec,
- la Rhodamine WT pour le temps de pluie,

avec des mesures à un pas de temps fin de l'ordre de la seconde.

Un traçage avec des échantillons prélevés à des pas de temps plus longs (30 secondes) est moins précis.

2.2 Méthodes de traçage et types d'injection

Trois méthodes de traçage existent :

- **La méthode par dilution** consiste à injecter en une seule fois (**injection instantanée**) **ou** en continu (**à débit constant**) une solution de traceur à l'amont, et à mesurer en un point à l'aval les variations de concentration du traceur au cours du temps.
- **La méthode du temps de transit**, le mesurage s'effectue après injection instantanée, sur deux sections à l'aval, le nuage de traceur se déplaçant à la vitesse moyenne de l'écoulement.

☛ **La méthode par dilution à injection instantanée est la plus facile à mettre en œuvre pour le temps sec.** Elle demande moins de matériel et de personnel que les méthodes par dilution à débit constant et du temps de transit.

Tableau 2 : tableau comparatif des méthodes de traçage (source Bertrand-Krajewski et al., 2000)

Méthode de traçage	Avantages	Inconvénients
Méthode de dilution avec injection instantanée du traceur	<ul style="list-style-type: none"> - peu de matériel nécessaire - rapide et peu coûteuse - personnel réduit - quantité de traceur plus faible 	<ul style="list-style-type: none"> - nécessité d'avoir un débit mesuré Q constant pendant l'opération (temps sec) - difficulté pour déterminer avec exactitude le début et la fin du passage du traceur - débit et vitesse doivent pouvoir être évalués
Méthode de dilution avec injection à débit constant du traceur	<ul style="list-style-type: none"> - ne nécessite aucune connaissance préalable de la section mouillée - détermination facile du début et de la fin du passage du traceur 	<ul style="list-style-type: none"> - nécessité d'avoir un débit mesuré Q constant pendant l'opération (temps sec) - besoins importants en matériel et traceur - nécessité d'avoir plusieurs opérateurs
Méthode du temps de transit	<ul style="list-style-type: none"> - aucune connaissance préalable des débits ni des concentrations en traceur n'est nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> - application plus délicate en surface libre car il faut deux mesurages de hauteur pour déterminer les sections mouillées

3. PRÉCAUTIONS

Le tronçon de mesure doit répondre aux critères suivants:

- ne pas présenter d'arrivée ou de fuite du traceur (branchements, nœuds,...) ;
- permettre un bon mélange et une concentration homogène du traceur, avec des vitesses d'écoulement suffisamment élevées et une turbulence importante (éviter les zones mortes).

3.1 Bruit de fond

Si le traceur est présent dans l'écoulement à la concentration supposée constante pendant la durée des mesures, il faut soustraire ce bruit de fond à la concentration mesurée. La moyenne des concentrations mesurées du traceur pendant plusieurs minutes, en enlevant les valeurs aberrantes, avant et après le traçage, permet d'estimer le bruit de fond.

Il faut que le pic de concentration du traçage soit au moins 3 fois supérieur au bruit de fond, dans la limite de la gamme de mesure de l'appareil (fluorimètre, conductimètre, ...).

3.2 Distance de bon mélange

La distance de bon mélange est atteinte lorsque la concentration de traceur est homogène à travers toute la section de mesure. La distance entre le point d'injection et le point de mesure du traceur doit être supérieure à celle du bon mélange (voir 4.2 : calculs de L_{BM}).

4. DÉTAILS DE LA MÉTHODE DE TRAÇAGE PAR DILUTION AVEC INJECTION INSTANTANÉE : vérification du débit et des vitesses avec le calcul des incertitudes

4.1 Principe

La méthode de dilution avec injection instantanée est la plus simple à mettre en oeuvre, avec les hypothèses suivantes:

- le débit Q est supposé constant dans le tronçon de mesure pendant toute la durée du traçage (bien choisir le lieu et la plage horaire en temps sec);
- la masse M de traceur est conservée, ce qui permet d'écrire :

$$M = C_0 V_0 = Q \int_{t_{AR}}^{t_{AR} + T_p} C(t) dt$$

- Avec :
- M : masse de traceur introduite dans l'écoulement (kg ou g)
 - C_0 : concentration initiale en traceur (kg/m³ ou g/L)
 - V_0 : volume injecté (m³ ou L)
 - Q : débit à mesurer (m³/s ou L/s)
 - $C(t)$: concentration dans la section de mesure (kg/m³ ou g/L)
 - t_{AR} : instant de l'arrivée du traceur dans la section de mesure (s)
 - T_p : durée de passage du traceur dans la section de mesure (s).

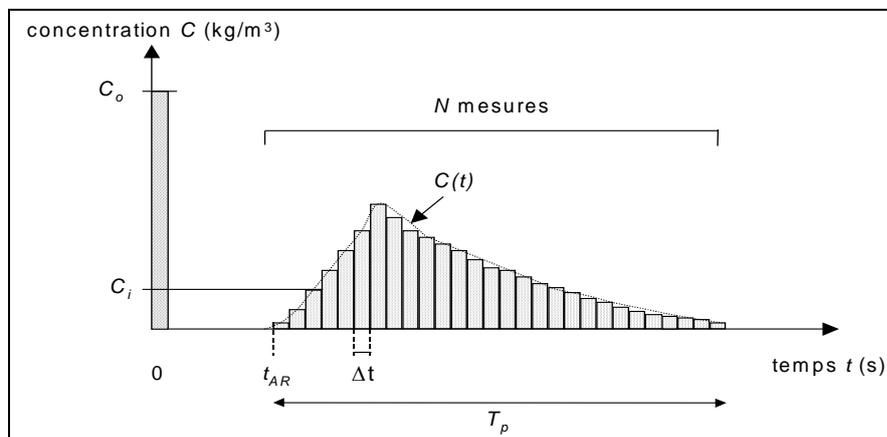


Figure 1 : traçage par injection instantanée (source Bertrand-Krajewski et al., 2000)

On applique la version discrétisée de l'équation précédente :

$$Q = \frac{M}{\Delta t \sum_i C_i} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{M}{\Delta t \sum_i (C_i - C_n)} \quad \text{avec un bruit de fond}$$

Avec : Q débit à mesurer (m^3/s ou L/s)
 M masse de traceur introduite dans l'écoulement (kg ou g)
 Δt pas de temps du système d'acquisition de la concentration (s)
 C_i concentrations à chaque pas de temps i lors du passage du traceur (mg/L)
 C_n concentration avant et après le passage du traceur = bruit de fond (mg/L).

Le traceur le plus facile et le moins coûteux à utiliser est le chlorure de sodium (NaCl), comme dans l'exemple suivant correspondant à un traçage au sel réalisé par le Grand Lyon.

4.2 Illustration :

Exemple d'un traçage par méthode de dilution avec injection instantanée, au sel de voirie à Irigny dans un collecteur T180 non circulaire (Grand Lyon).

a) Matériel et méthode:

Pour vérifier un débitmètre en temps sec dans un collecteur du Grand Lyon, le traçage a été effectué avec:

- un conductimètre et une centrale d'acquisition (pas de temps 1 seconde) ;
- 5 kg de sel de voirie et 1 L d'eau distillée pour établir la relation entre la concentration en sel et la conductivité, mesures réalisées avec la balance 1 (précision ± 1 mg) ;
- 20 L d'eau potable (on négligera sa teneur en sel d'origine) pour fabriquer la solution mère, mesures réalisées avec la balance 2 (précision ± 20 g) ;



Figure 2 : conductimètre, balances 1 et 2 utilisés (source Grand Lyon - Insa Lyon)

Il faut injecter une masse M de sel en fonction de la concentration moyenne naturelle en sel (bruit de fond) et des caractéristiques de l'écoulement (hauteur, largeur, vitesse, débit). On mesure la conductivité à un pas de temps Δt fin, pour connaître l'évolution de la concentration en sel, avec un conductimètre compensé en température (influence sur les valeurs des mesures) et réglé avec au moins une solution étalon.

b) Relation entre la conductivité et la concentration en sel:

Au lieu d'utiliser les relations théoriques ($1,86 \mu\text{S}/\text{cm}$ pour $1 \text{ mg}/\text{L}$ de sel à 18°C , valable uniquement pour du NaCl pur), il est nécessaire d'établir une relation spécifique entre la conductivité et la concentration en sel de voirie utilisé, où la linéarité se situe entre 0 et $5,8 \text{ g}/\text{L}$ ($11000 \mu\text{S}/\text{cm}$ environ).

En sachant qu'après dilution du traceur, il faut que, dans notre cas, la conductivité passe de 1000 $\mu\text{S/cm}$ (bruit de fond) à un pic de 3000 $\mu\text{S/cm}$ (Cond_{max}), soit une concentration qui variera de 0,5 à 2 g/L environ. On peut donc faire quelques solutions de 250 mL environ dans cette gamme, en pesant le sel de voirie et l'eau distillée avec la balance 1.

On obtient un coefficient de 0.516 pour la relation linéaire entre la conductivité ($\mu\text{S/cm}$) et la concentration de traceur (mg/L).

La concentration maximale de sel C_{max} que l'on souhaite mesurer sera au moins égale à :

$$C_{\text{max}} = \text{Cond}_{\text{max}} * 0,516 = 3000 * 0,516 = 1548 \text{ mg/l} = 1,548 \text{ kg/m}^3 \text{ (ou g/L)}$$

c) Ordre de grandeur du débit Q et de la vitesse V :

On prendra comme référence la mesure du débit à partir d'une hauteur d'eau, en utilisant une vitesse mesurée (doppler, radar, bouchon) ou la formule de Manning-Strickler (voir fiche méthodologique n°6 : Calcul du débit à partir de la hauteur d'eau).

Avec le débitmètre installé dans un collecteur non circulaire, en temps sec et en fin de matinée, le débit Q est calculé à partir de la vitesse V et de la surface S (fonction de la hauteur H), alors $Q = S(H) * V$.

Avec : $H_{\text{moyenne}} = 0,3 \text{ m}$ alors $S(H) = 0,166 \text{ m}^2$

$$V_{\text{moyenne}} = 0,3 \text{ m/s.}$$

Le débit Q_{moyen} calculé par le débitmètre est de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ou 50 L/s.

d) Longueur de bon mélange, distance d'injection :

La longueur de bon mélange L_{BM} peut être estimée par la formule du CREC:

$$L_{\text{BM}} = 9,5 h \frac{V}{\sqrt{gRJ}}$$

Avec : h hauteur d'eau (m)

V vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)

$R(h)$ rayon hydraulique (m) = surface / périmètre mouillé

J pente de la ligne d'énergie ou pente I de la canalisation (m/m).

Avec une pente I de $1,25 \times 10^{-3} \text{ m/m}$ et à partir des valeurs du débitmètre, la longueur de bon mélange est de 21,8 m.

On peut aussi prendre pour L_{BM} 75 fois la plus grande distance hydraulique de l'écoulement (hauteur, largeur) si l'injection est faite au centre de l'écoulement ($L_{\text{BM}} = 25 * H_{\text{moyenne}} = 25 * 0,3 = 22,5 \text{ m}$), 150 fois si elle est faite sur le bord.

Une injection de fluorescéine au centre de l'effluent, à 25 mètres ($> L_{\text{BM}}$) en amont de la section de mesure, a permis de chronométrer, de manière visuelle, un temps de passage T_p de 75 secondes, ce qui permettra de déterminer l'ordre de grandeur de la masse de traceur à injecter.

e) Ordre de grandeur de la masse de traceur à injecter:

On peut estimer la masse M_{INJ} de traceur à injecter dans l'écoulement à partir de plusieurs paramètres, avec la formule suivante :

$$M_{\text{INJ}} = \frac{C_{\text{MAX}} S \sqrt{4 \pi K_x t_{\text{CMAX}}}}{e^{\left(- \frac{(x - Ut_{\text{CMAX}})^2}{4 K_x t_{\text{CMAX}}} \right)}}$$

On peut utiliser pour valeur du coefficient de dispersion longitudinale $K_x = 6 h \sqrt{ghI}$

Avec : M masse de traceur à injecter (g)

C_{max} concentration maximale que l'on souhaite mesurer (g/m^3)

S section de l'écoulement (m^2)

h hauteur d'eau dans l'écoulement (m)

g accélération de la pesanteur (= 9.81 m.s^{-2})

I pente du radier (m/m)

x distance depuis le point d'injection (m)

t_{CMAX} le temps de passage du traceur (s)

U vitesse estimée dans l'écoulement (m/s).

Avec les valeurs citées dans les points précédents, la masse de sel à injecter est de 2 311 grammes.

f) Préparation et injection de la solution mère :

Pour avoir un minimum de volume pour une injection rapide, il est conseillé d'avoir une solution mère à une concentration $C_0 = 300$ g/L, qui est inférieur à la limite de solubilité (360 g/L environ, variable avec la température).

2400 grammes de sel ont donc été dissous dans 8 litres ou 8 kilogrammes d'eau potable dans 2 bonbonnes, pour faire éventuellement 2 injections si l'on veut vérifier le résultat ou recommencer en cas de problème.

On peut aussi se servir de la balance pour connaître non pas un volume de solution salée (1 litre de solution saline est plus lourd que 1 kg), mais la masse exacte de traceur injecté, en procédant de la façon suivante:

- peser une masse de sel = m_1 et la diluer dans une masse d'eau = m_2 ;
- calculer la concentration en sel $C_0 = m_1/m_2$ (g/kg) de solution mère ;
- injecter une masse m_3 de solution mère dans un récipient de masse = m_4 à vide ;
- peser la masse m_5 du récipient avec les quelques gouttes qu'il contient encore ;
- déduire la masse M de traceur introduite qui est égale à M exacte = $(m_5 - m_4) \times C_0$.

Voici ci-dessous l'évolution de la conductivité pour une injection d'une masse de sel de 2 400 g soit 8 L de solution mère à 300 g/L d'un poids de 10,4 kg.

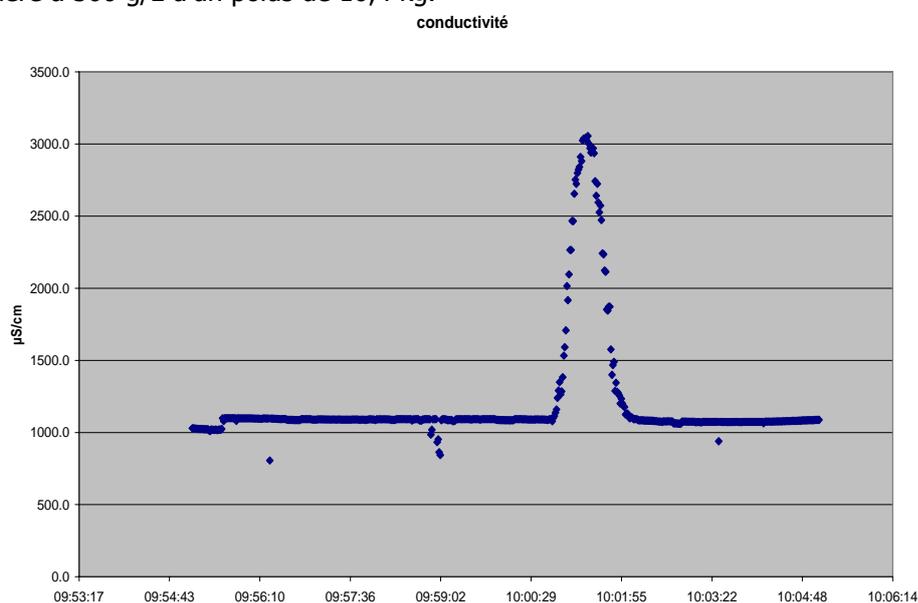


Figure 3 : Évolution de la conductivité après injection de 2.4 kg de sel (source Grand Lyon)

g) Calcul du débit obtenu par traçage et son incertitude, comparaison avec le débitmètre :

En utilisant la formule avec le bruit de fond (voir 4.1) et en validant au préalable les valeurs de conductivité, on peut calculer le débit obtenu par traçage:

$$Q = \frac{M}{\Delta t \cdot \sum C_i - C_n}$$

Avec : M masse de sel = 2400 g

Δt pas de temps d'acquisition des conductimètres = 1 s

$\sum(C_i - C_n)$ Somme des concentrations pendant 97 secondes = 36,0175 kg/m³ (ou g/L)

Le débit Q calculé par traçage est donc de 41,65 L/s.

Au moment du traçage, le débitmètre sur site, équipé d'une sonde de hauteur piézométrique et d'une vitesse doppler va permettre de comparer les débits mesurés.

Avec $H = 0,258 \pm 0,012$ m alors $S(H) = 0,12167 \pm 0,0121$ m²

$V = 0,33 \pm 0,1$ m/s.

Le débit Q calculé par le débitmètre est de $40,15 \pm 13,8$ L/s (voir fiche méthodologique n° 3 : Calcul d'incertitude du débit dans un collecteur non circulaire)

La différence de 1,5 L/s est très faible entre les débits mesurés par traçage et par le débitmètre. Pour savoir si elle est significative, il faut calculer également les incertitudes lors du traçage.

L'intervalle de confiance à 95% ΔQ du débit Q obtenu par traçage, correspondant à 2 incertitudes type $u(Q)$, est égal à:

$$\Delta Q = 2 \sqrt{u(C_0)^2 \left(\frac{V_0}{\Delta t \cdot \sum C_i} \right)^2 + u(V_0)^2 \left(\frac{C_0}{\Delta t \cdot \sum C_i} \right)^2 + u(\sum C_i)^2 \left(-\frac{C_0 V_0}{\Delta t \cdot (\sum C_i)^2} \right)^2}$$

Avec : $u(M) = 5 \cdot 10^{-4}$ g pour la masse de sel mesuré

$u(V_0) = 10^{-2}$ L = 10^{-5} m³ pour le volume d'eau de la solution mère

$u(C_0) = \sqrt{(u(M))^2 + (u(V_0))^2} = \pm 10^{-5}$ kg/m³ pour la concentration en sel de la solution mère

$u(C_{\text{ond}}) = 5$ μ S/cm pour le conductimètre mesurant la concentration C_i du traceur

$u(C_i) = u(C_{\text{ond}}) \cdot \text{coefficient conductivité / concentration} = 5 \cdot 0,516 = 0,003$ kg/m³

$u(\sum C_i) = u(C_i) \cdot \text{nombre de pas de temps} = 0,003 \cdot 97 = \pm 0,251$ kg/m³ (ou g/L)

L'incertitude sur le débit mesuré par traçage est donc de 0,6 L/s (1,5%).

L'incertitude sur le débit mesuré par le débitmètre de 13,8 L/s (30,4%) est bien plus élevée. Les intervalles de confiance des débits mesurés par traçage et par le débitmètre se recoupent partiellement (voir fiche méthodologique n° 2 : comparaison de 2 valeurs). Les débits mesurés par les deux méthodes ne sont donc pas significativement différents.

On peut dire que le débitmètre marche correctement pour un débit de 40 L/s.

On peut faire la même comparaison sur la vitesse.

h) Calcul de la vitesse obtenue par traçage et son incertitude, comparaison avec le débitmètre :

La vitesse V obtenue par traçage est calculée à partir du débit Q obtenu par traçage et de la surface S qui est fonction de la hauteur H, alors $V = Q / S(H)$

Avec les valeurs citées dans le point précédent, la vitesse obtenue par traçage est de 0,334 m/s. Elle est très proche de la valeur fournie par le débitmètre (0,33 m/s). Pour savoir si la différence est significative, il faut calculer les incertitudes de la vitesse lors du traçage.

En appliquant la loi de propagation des incertitudes à l'équation de vitesse, en considérant que les incertitudes sur S et H sont totalement corrélées entre elles et indépendantes de l'incertitude sur V, l'incertitude type au carré de la vitesse est:

$$u(V)^2 = \left(u(S) \left(\frac{\partial V}{\partial S} \right) + u(H) \left(\frac{\partial V}{\partial H} \right) \right)^2 + u(Q)^2 \left(\frac{\partial V}{\partial Q} \right)^2$$

En appliquant les valeurs citées dans le point précédent sur la version discrétisée de l'équation, l'incertitude sur la vitesse obtenue par traçage est de 0,056 m/s (16,3 %).

L'incertitude sur la vitesse obtenue pour un débitmètre équipé d'un doppler est plus élevée car elle est au minimum de 0,1 m/s (30,3 %) quand la hauteur est comprise entre 0,05 et 0,3 m.

Les intervalles de confiance des vitesses mesurées par traçage et par le débitmètre se recoupent partiellement.

Les vitesses mesurées par les deux méthodes ne sont donc pas significativement différentes.

➔ On peut conclure dans l'exemple détaillé que le débitmètre marche correctement pour une vitesse de 0,3 m/s.

5. BIBLIOGRAPHIE

Bertrand-Krajewski J.-L., Laplace D., Joannis C., Chebbo G. (2000). Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Paris (France) : éditions Tec&Doc, 808 p., ISBN : 2-7430-0380-4.

Partie 4 : Mesurage des flux polluants - Chapitre 13 : Mesurage du débit par traçage

En complément voir Fiche méthodologique n° 2 : comparaison de 2 valeurs ; n° 3 : Calcul d'incertitude du débit dans un collecteur; n°6 : Calcul du débit à partir de la hauteur d'eau

6. CONTACT

Billat C., Luchinacci P., Grand Lyon

Beranger Y., Graie

Bertrand-Krajewski J.-L., Lepot M., Insa Lyon