

Mesurage de l'exfiltration en réseaux d'assainissement par traçage artificiel au NaCl

J. De Bénédittis ^{(1)*}, J.-L. Bertrand-Krajewski ⁽¹⁾

⁽¹⁾ URGC Hydrologie Urbaine, INSA de Lyon, 34 avenue des Arts, 69621 Villeurbanne cedex
(E-mail : jerome.de-benedittis@insa-lyon.fr, jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr)

Résumé

Les volumes d'effluents exfiltrés des réseaux d'assainissement sont difficilement mesurables en raison de leur caractère diffus liés à la forte variabilité des conditions hydrauliques dans les sous-sols urbains et à la localisation des défauts d'étanchéité. Les méthodes de mesure développées à ce jour ne permettent pas d'évaluer l'exfiltration dans des conditions naturelles d'écoulement et à une échelle spatiale assez fine qui permettent d'intégrer cette information dans des stratégies de réhabilitation des ouvrages. Rieckermann (2003) a développé une méthode de mesure reposant sur un traçage artificiel au NaCl selon le protocole QUEST. Cet article a pour but de décrire le principe général de cette méthode et les résultats obtenus lors de sa mise en œuvre sur un tronçon du réseau d'assainissement du Grand Lyon. Les taux d'exfiltration mesurés entre juillet 2003 et juillet 2004 varient entre 2 et 16 %. Cette variabilité semble liée à des effets de saisonnalité entre périodes de hautes eaux et de basses eaux. Une variabilité événementielle liée directement aux événements pluvieux a également été mise en évidence.

Mots clés

Exfiltration, réseaux d'assainissement, traçage artificiel, incertitude.

INTRODUCTION

La dégradation progressive de l'état structurel d'un réseau d'assainissement conduit à la formation de défauts d'étanchéité qui, selon le niveau piézométrique des eaux souterraines et/ou les conditions hydriques dans la tranchée d'assainissement, peuvent générer deux phénomènes, l'infiltration d'eaux souterraines et l'exfiltration d'effluents. Le premier phénomène est le plus étudié car ses impacts sur le fonctionnement et l'efficacité des systèmes d'assainissement sont clairement observables, notamment le dysfonctionnement des stations d'épuration en raison de la dilution des effluents et de la diminution de la capacité hydraulique des ouvrages. L'exfiltration d'effluents a suscité jusqu'à présent un intérêt minime pour la communauté scientifique et les gestionnaires, alors que ses impacts sur les milieux naturels peuvent potentiellement être plus nocifs que ceux générés par l'infiltration. En effet, l'exfiltration d'effluents peut contribuer à la recharge des eaux souterraines et nuire considérablement à la qualité d'eaux utilisables pour l'alimentation en eau potable. De plus, les échanges d'eau entre le collecteur et son environnement accélèrent le vieillissement des ouvrages et présentent un risque physique pour l'intégrité des infrastructures urbaines. Depuis la dernière décennie, les problèmes écologiques liés à l'exfiltration sont reconnus comme un risque pour la santé publique et l'étanchéité des réseaux d'assainissement fait partie des prescriptions de la norme européenne EN 752-2 (1995). La mesure de l'exfiltration constitue logiquement un indicateur de l'impact et des risques potentiels générés par les collecteurs non étanches qui peut être pris en compte dans une stratégie globale de réhabilitation des réseaux d'assainissement. Selon Neitzke (2002), les méthodes de mesure développées à ce jour peuvent être classées dans deux catégories : (i) les méthodes indirectes et (ii) les méthodes directes. Les méthodes indirectes reposent sur une approche globale à l'échelle d'un bassin versant ou d'une agglomération au moyen de bilans volumétriques annuels appliqués soit aux composantes du débit d'eaux usées de temps sec (Härig, 1991), soit aux composantes de la recharge des aquifères urbains (Lerner, 1990). Cependant, l'exfiltration, source potentielle de recharge et de pollution des eaux souterraines urbaines, peut être confondue qualitativement avec d'autres sources telles que les rejets d'effluents non collectés et l'infiltration des eaux pluviales. Ce type de méthode permet de mettre

en évidence un phénomène et d'apprécier un risque global, mais il ne permet pas de localiser les exfiltrations et de développer des stratégies de réhabilitation adaptées. Les méthodes directes reposent sur une approche locale (défaut, tronçon) au moyen de tests d'étanchéité à l'eau (Decker, 1994) ou des mesures de teneur en eau dans la tranchée d'assainissement (Zacher, 1994). Les exfiltrations sont probablement surestimées car les pressions utilisées ne correspondent pas aux conditions hydrauliques réelles et peuvent provoquer un effet de curage des défauts d'étanchéité. De plus ce ne sont pas des méthodes de prospection puisqu'il faut connaître l'état réel ou supposé du réseau pour appliquer les méthodes efficacement, ce qui constitue un obstacle majeur pour la généralisation de leur application.

Le mesurage de l'exfiltration n'est pas à ce jour réalisé avec des méthodes précises et/ou adaptées qui soient représentatives et applicables en routine. Ce constat est à l'initiative du programme de recherche européen APUSS (Assessing infiltration and exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems) dont un des objectifs scientifiques est de tester et valider des méthodes de mesures directes de l'exfiltration qui soient simples, peu coûteuses, précises, non polluantes et qui ne modifient pas l'écoulement des eaux usées dans les collecteurs. Les méthodes développées sont dérivées de la méthode de mesure du débit par traçage artificiel. Rieckermann (2003) propose le mesurage de l'exfiltration par traçage artificiel au NaCl selon la méthode QUEST (Quantification of Exfiltration from Sewers with artificial Tracers). Un protocole expérimental provisoire a été établi à partir de nombreux tests réalisés sur le réseau d'assainissement de Rümlang (Suisse) au niveau d'un collecteur unitaire en très bon état structurel qui est situé en milieu rural et présente un linéaire de 2000 m sans connections latérales. Ces conditions particulières sont idéales pour le développement de la méthode et l'appréciation de sa faisabilité. Dans le cadre du projet APUSS, des campagnes de mesure sont réalisées dans différentes villes d'Europe (Dresde, Lyon, Rome, Berlin, Londres) afin d'aboutir à un protocole expérimental définitif utilisable sur des tronçons possédant des arrivées latérales, des branchements, etc.

L'objectif de cette communication est de présenter de manière détaillée le principe général de la méthode QUEST et les résultats expérimentaux obtenus lors de son application sur le réseau d'assainissement du Grand Lyon. De nouvelles spécifications techniques ou scientifiques sont apportées. Elles concernent principalement : le choix d'un site de mesure, la détermination de la masse de NaCl à injecter, la définition des conditions optimales de mesure et une approche de l'incertitude analytique sur l'exfiltration mesurée.

MESURAGE DE L'EXFILTRATION SELON LA METHODE QUEST

Principe général

Le principe de la mesure (Figure 1) repose sur la restitution d'une masse connue de NaCl injectée en amont d'un collecteur de plusieurs centaines de mètres (injection de mesure ou indicateur). Un bilan de masse est calculé entre la masse injectée en amont M_{ind} et la masse restituée en aval du tronçon de collecteur étudié M_{rest} (Figure 2).

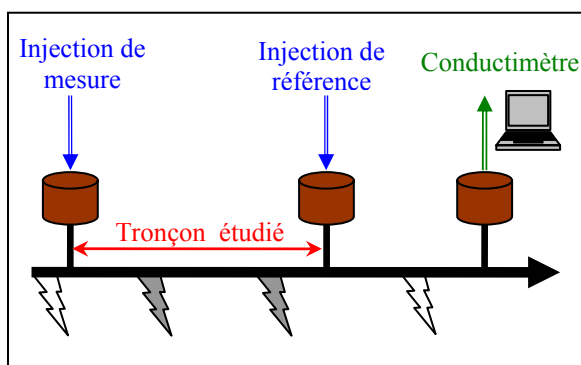


Figure 1: Schéma de principe de la mesure de l'exfiltration par traçage artificiel.

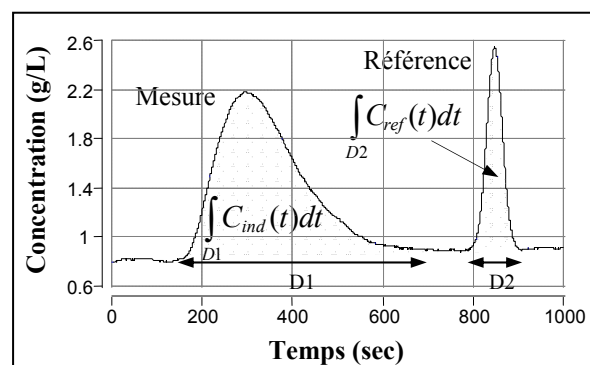


Figure 2: Courbe de restitution de traceur lors d'une mesure d'exfiltration (Rieckermann, 2003).

Le pourcentage en masse perdu est équivalent au pourcentage d'eaux usées marquées exfiltrées le long du collecteur. La masse restituée est déterminée grâce à la mesure en continu de la conductivité S ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux usées dont la relation linéaire avec la concentration C en NaCl doit être déterminée en laboratoire. Une injection de NaCl dite de référence M_{ref} réalisée juste avant le

point de mesure permet de calculer de manière classique le débit d'eaux usées Q et de déterminer ainsi le taux d'exfiltration E exprimé en % selon les équations suivantes :

$$M_{rest} = Q \int_{D1} C_{ind}(t) dt \quad \text{Eq.1} \qquad M_{exf} = M_{ind} - Q \int_{D1} C_{ind}(t) dt \quad \text{Eq.2}$$

$$Q = \frac{M_{ref}}{\int_{D2} C_{ref}(t) dt} \quad \text{Eq.3} \qquad E = 100 \frac{M_{exf}}{M_{ind}} = 100 \left(1 - \frac{\int_{D1} C_{ind}(t) dt}{\int_{D2} C_{ref}(t) dt} \frac{M_{ref}}{M_{ind}} \right) \quad \text{Eq.4}$$

Traitement des signaux de conductivité et calcul du taux d'exfiltration E

Le calcul du taux d'exfiltration repose sur un traitement des signaux de conductivité qui consiste à définir les pics générés par une injection de mesure et une injection de référence et à les isoler du bruit de fond du traceur par soustraction de la conductivité de base des eaux usées S_B . La courbe de restitution schématique illustrée sur la Figure 3 permet de mieux détailler les étapes du calcul.

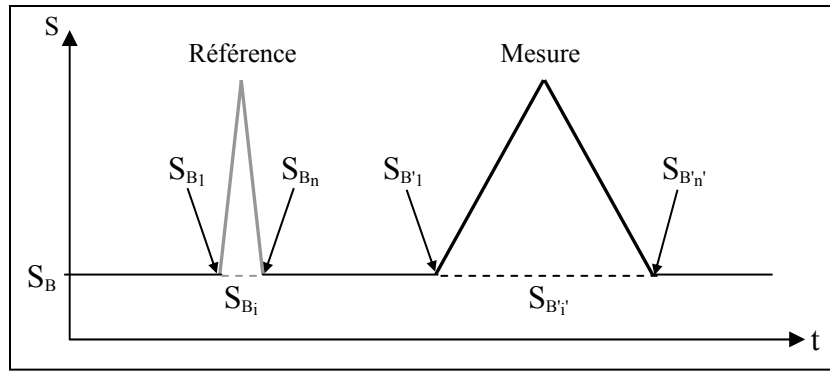


Figure 3: Traitement des signaux de conductivité pour le calcul de l'exfiltration.

Les n valeurs théoriques de la conductivité de base S_{Bi} durant le temps de passage d'une injection de référence sont calculées pour chaque pas de temps i selon l'équation 5 par interpolation linéaire entre la première valeur de conductivité S_{B1} et la dernière valeur de conductivité S_{Bn} qui définissent le signal de référence. Les n valeurs de conductivité S_{ref_i} sont calculées pour chaque pas de temps i en soustrayant à la valeur de conductivité observée S_i la valeur de la conductivité de base correspondante S_{Bi} . De même, les n' valeurs de conductivité $S_{ind_{i'}}$ qui définissent le signal de mesure sont calculées pour chaque pas de temps i' .

$$S_{Bi} = S_{B1} + \frac{(S_{Bn} - S_{B1})(i - 1)}{n - 1} \quad \text{Eq. 5} \qquad S_{ref_i} = S_i - S_{Bi} \quad \text{Eq. 6}$$

$$S_{B'i'} = S_{B'1} + \frac{(S_{B'n'} - S_{B'1})(i' - 1)}{n' - 1} \quad \text{Eq. 7} \qquad S_{ind_{i'}} = S_{i'} - S_{B'i'} \quad \text{Eq. 8}$$

Les conductivités généralement observées lors du passage des signaux de référence et de mesure restent dans le domaine de linéarité de la relation entre conductivité S et concentration C en NaCl. Il n'est donc pas nécessaire de convertir en concentration en NaCl les n valeurs de conductivité S_{ref_i} et les n' valeurs de conductivité $S_{ind_{i'}}$ pour calculer le taux d'exfiltration E selon l'équation 9 :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i'=1}^{n'} S_{ind_{i'}} m_{ref}}{\sum_{i=1}^n S_{ref_i} m_{ind}} \quad \text{Eq. 9}$$

Les masses de solution de traceur respectives utilisées pour l'injection de référence m_{ref} et l'injection de mesure m_{ind} sont déterminées par pesée de la solution disposée dans un container spécifique avant et après la réalisation des injections. Une courbe de conversion de la conductivité

électrique en concentration en NaCl doit cependant être établie en laboratoire afin de vérifier la relation $C = KS$ pour la sonde conductimétrique et le sel qui seront utilisés pour la mesure.

Calcul de l'exfiltration et de l'incertitude associée

L'incertitude ΔE associée à la valeur calculée du taux d'exfiltration E est donnée par l'équation 10 :

$$\Delta E = \frac{2m_{ref} \sqrt{u(m_{ref})^2 \left(\frac{\sum_{i'=1}^{n'} S_{ind\ i'}}{m_{ref}} \right)^2 + u(m_{ind})^2 \left(\frac{\sum_{i'=1}^{n'} S_{ind\ i'}}{m_{ind}} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{i'=1}^{n'} S_{ind\ i'}}{\sum_{i=1}^n S_{ref\ i}} \right)^2 u \left(\sum_{i=1}^n S_{ref\ i} \right)^2 + u \left(\sum_{i'=1}^{n'} S_{ind\ i'} \right)^2}}{m_{ind} \sum_{i=1}^n S_{ref\ i}}$$

Les incertitudes types $u(m_{ref})$ et $u(m_{ind})$ sur les masses de solution injectées m_{ref} et m_{ind} sont définies par la précision de la balance (20 g) utilisée pour peser les containers contenant la solution avant et après la réalisation des injections. L'incertitude type $u(S)$ associée à une valeur mesurée S de conductivité est définie par la précision donnée par le constructeur (0,5 %).

$$u(m_{ref}) = u(m_{ind}) = \sqrt{200} \quad \text{Eq. 11}$$

$$u(S) = \frac{0,005S}{2} \quad \text{Eq. 12}$$

MISE EN ŒUVRE DU MESURAGE

La mise en oeuvre d'une mesure d'exfiltration par traçage demande une préparation préliminaire importante aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. Quatre étapes sont nécessaires pour établir un protocole expérimental adapté au contexte.

Définition des biefs de référence et de mesure

Ils correspondent respectivement au linéaire de collecteur entre le point d'injection de référence et la section de mesure que l'on appellera « bief de référence » et au linéaire de collecteur entre le point d'injection de référence et la section de mesure que l'on appellera « bief de mesure ». Ces deux biefs sont déterminés lors d'une visite de terrain par la sélection minutieuse de trois regards. Pour le choix du bief de référence, on peut reprendre les critères exigés pour une mesure de débit par traçage artificiel (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000). Le choix du bief de mesure n'est pas restreint par la longueur de bon mélange ou la présence de connections latérales. Les vitesses d'écoulement en amont du bief de mesure doivent cependant être suffisantes pour transporter correctement le traceur. Pour des raisons pratiques et de sécurité, il est préférable que la section de mesure et les deux points d'injection soient accessibles par des regards sous trottoirs ou sous chaussées mais toujours de manière à préserver la sécurité du personnel qui réalise la manipulation et la circulation des véhicules en surface. La longueur x des biefs est ensuite déterminée sur plan.

Acquisition de données sur le site étudié

L'acquisition des données descriptives du site est effectuée auprès des gestionnaires du réseau. Si certaines données sont manquantes, elles doivent être acquises avant et pendant l'essai préliminaire :

- données structurelles : linéaire de réseau inspecté, pente I , section S , etc.
- données débitométriques : Rieckermann (2003) recommande de réaliser des mesures en continu de débit à haute résolution temporelle (pas de temps de deux minutes) durant 2 à 7 jours avant la mesure d'exfiltration.
- conductivité des eaux usées : le suivi de la conductivité au niveau de la section de mesure permet d'apprécier la conductivité de base des eaux usées et de déterminer en première approche la quantité de traceur qu'il faudra surimposer au milieu à chaque point d'injection pour obtenir des pics de conductivité bien distincts. La mesure en continu (pas de temps d'une seconde) est impérative afin de déterminer la période de la journée où la conductivité est relativement constante ; ce sera la période idéale pour réaliser la mesure d'exfiltration. Si la conductivité des eaux usées présente une variabilité au cours de la journée qui est trop importante, l'utilisation du NaCl comme

traceur artificiel est compromise. Il est alors recommandé d'utiliser des traceurs dont le bruit de fond dans l'écoulement est négligeable ou absent, par exemple le LiCl ou la Rhodamine WT dont l'injection est effectuée en continu selon le protocole QUEST-C (voir Rieckermann 2003).

L'essai préliminaire

L'essai préliminaire consiste à évaluer sur le terrain les temps de résidence réels de l'injection de référence $t_{R(ref)}$ et de l'injection de mesure $t_{R(mes)}$ dans leurs biefs respectifs par l'analyse des courbes de restitution obtenues. A partir des données acquises lors des étapes précédentes, la masse de traceur à injecter à une distance donnée de la section de mesure afin d'obtenir un pic de concentration de valeur définie peut être estimée en utilisant l'équation de dispersion longitudinale. D'après Daily et Harleman (1966), il est possible de calculer, pour une masse injectée de traceur M , la valeur de la concentration en traceur $C(x,t)$ dont le bruit de fond est nul, à un instant t après l'injection, à une distance x du point d'injection où on fait l'hypothèse que la distance de bon mélange est atteinte :

$$C(x,t) = \frac{M}{S\sqrt{4\pi K_x t}} \exp\left(-\frac{(x-Ut)^2}{4K_x t}\right) \quad \text{Eq.13}$$

$$K_x \cong 6h\sqrt{ghI} \quad \text{Eq. 14}$$

Rieckermann (2003) recommande d'utiliser le coefficient de dispersion longitudinale K_x défini pour un écoulement dans un canal rectangulaire (équation 14). La vitesse de l'écoulement U (m/s) et la hauteur d'eaux usées h sont mesurées pour estimer le débit. La section S (m²) et la pente I (m/m) sont connues. L'équation 13 donne pour chaque injection la courbe de restitution théorique du traceur approximée par une gaussienne. Le temps de résidence théorique du traceur peut alors être décrit par un temps de transit t_t , un temps d'arrivée t_{ar} et un temps de passage t_p . On définit également l'instant t_{Cmax} auquel la concentration en traceur sera maximale. Rieckermann (2003) conseille de déterminer les masses de traceur de l'injection de référence M_{ref} et de l'injection de mesure M_{ind} de manière à ce que les pics observés soient du même ordre de grandeur et bien distincts du bruit de fond C_B des eaux usées (3 à 4 fois supérieurs). L'ordre de grandeur de C_B étant connu, on en déduit la valeur souhaitée du pic de concentration C_{max} . La masse de traceur M à injecter (M_{ref} ou M_{ind}) peut alors être calculée selon l'équation 17.

$$t_{Cmax} = t_t + \frac{t_p}{2} \quad \text{Eq.15}$$

$$C_{max} = 3C_B \quad \text{Eq. 16}$$

$$M = \frac{C_{max} S \sqrt{4\pi K_x t_{Cmax}}}{\exp\left(-\frac{(x-Ut_{Cmax})^2}{4K_x t_{Cmax}}\right)} \quad \text{Eq.17}$$

La solution de traceur est de concentration identique pour l'injection de référence et l'injection de mesure, seuls les volumes varient pour injecter les masses M_{ref} et M_{ind} de NaCl. La concentration de la solution ne doit pas excéder 200 g/L afin de faciliter le mélange du traceur dans l'écoulement. Le volume des injections ne doit pas dépasser 30 ou 40 litres afin de réduire la durée de l'injection et le volume total de solution à transporter sur le terrain. Les valeurs des pics de conductivité obtenus lors de l'essai préliminaire permettent de vérifier si les masses de traceur M_{ref} et M_{ind} calculées sont bien adaptées. Les valeurs de t_{Cmax} et de U observées permettent si besoin de calculer une masse plus adéquate selon l'équation 17 qui sera appliquée avec une valeur de K_x calée de manière à reproduire les courbes de restitution du traceur enregistrées lors de cet essai préliminaire.

Finalisation du protocole expérimental d'une mesure d'exfiltration

La validité d'une mesure d'exfiltration repose sur l'hypothèse d'un débit d'eaux usées constant dans le temps et dans l'espace le long du tronçon étudié. Afin de diminuer l'impact de la variabilité de ce paramètre sur le mesurage, il est préférable de réduire le temps de résidence du traceur dans l'écoulement soit par le chevauchement des signaux de référence et de mesure, soit par la réduction du linéaire étudié ou soit les deux. Dans le premier cas, Rieckermann (2003) propose d'utiliser un modèle reposant sur la loi de Pearson 4 qui permet de reproduire l'intégralité des signaux de référence et de mesure lorsqu'ils se chevauchent afin de réaliser un calcul d'exfiltration. Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons préféré réduire le linéaire mais réaliser le mesurage de manière à obtenir des signaux séparés par un intervalle de temps optimisé Int qui permet d'observer la conductivité de base. L'obtention de pic séparé permet de simplifier considérablement les calculs et de s'affranchir des incertitudes liées à la modélisation et à la décomposition des signaux. La finalisation du protocole expérimental consiste à déterminer les instants $t_{ref(N)}$ et $t_{mes(N)}$ auxquels les N injections successives de référence et de mesure doivent être réalisées de manière à ce que les

signaux de référence et de mesure obtenus soient bien distincts et qu'un signal de mesure soit encadré par deux signaux de référence. L'expérimentation commence à l'instant $t = t_{mes(1)} = 0$ qui correspond à la première injection de mesure. La première injection de référence doit être effectuée à l'instant $t_{ref(1)}$ afin que le signal de mesure soit observé après le premier signal de référence selon un intervalle de temps Int . Connaissant le temps de résidence d'une injection de référence $t_{R(ref)}$ et le temps de transit d'une injection de mesure $t_{T(mes)}$, on détermine l'instant $t_{ref(1)}$ où la première injection de référence doit être réalisée. En fonction du temps de transit de l'injection de mesure, on peut réaliser une injection de référence supplémentaire à $t_{ref(0)}$.

$$t_{ref(1)} = t_{T(mes)} - Int - t_{R(ref)} \quad \text{Eq. 18} \qquad t_{ref(0)} = t_{ref(1)} - t_{P(mes)} - Int \quad \text{Eq. 19}$$

Pour les injections suivantes, qu'elles soient de référence ou de mesure, l'intervalle de temps entre deux injections est constant. Il correspond à la durée d'un cycle de mesure composé par deux intervalles de temps Int et les temps de passage respectifs des signaux de référence et de mesure. Le protocole expérimental d'une mesure d'exfiltration est alors finalisé. La durée d'une mesure d'exfiltration d_{mes} correspond à la durée du cycle calculée précédemment à laquelle on ajoute le temps de transit de l'injection de référence.

$$t_{ref(2)} - t_{ref(1)} = t_{mes(2)} - t_{mes(1)} = t_{P(mes)} + t_{P(ref)} + 2Int \quad \text{Eq. 20} \qquad d_{mes} = t_{P(mes)} + t_{R(ref)} + 2Int \quad \text{Eq. 21}$$

APPLICATION SUR LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT DU GRAND LYON

La méthode QUEST par traçage artificiel au NaCl a été mise en œuvre sur le Grand Lyon au niveau d'un collecteur visitable A180 situé sur le bassin versant d'Ecully. Après de nombreux tests préliminaires, six campagnes de mesures ont été réalisées entre juillet 2003 et juillet 2004.

Description du site expérimental

Le bassin versant d'Ecully représente une superficie de 245 ha caractérisée par un milieu urbain moyennement dense de type résidentiel. Le réseau d'assainissement de type unitaire suit le réseau hydrographique naturel constitué de ruisseaux drainant leurs nappes d'accompagnement respectives. Une station de mesure installée depuis 2001 à l'exutoire du bassin versant permet d'acquérir en continu des données de débit et de conductivité. Ces données ont été utilisées pour la mise en oeuvre du mesurage de l'exfiltration au niveau d'un tronçon expérimental (Figure 4) situé 500 m en amont. Par temps sec, le débit qui varie de 60 à 140 m³/h et la conductivité de base des eaux usées qui est de l'ordre de 800 μ S/cm sont relativement constants durant l'après-midi. Les campagnes de mesure ont donc été réalisées entre 14h00 et 17h00.

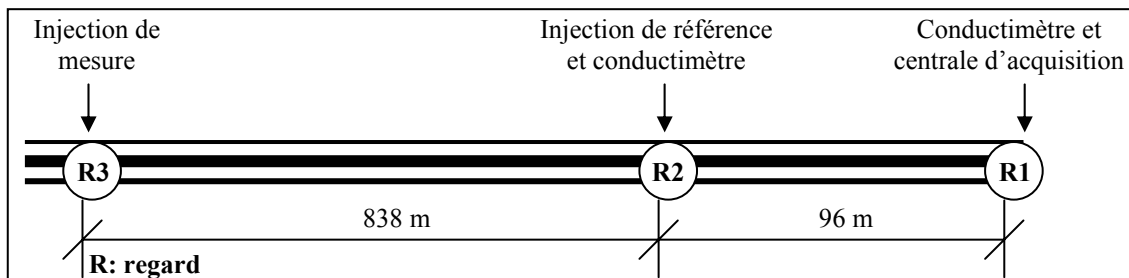


Figure 4: Schéma de principe du tronçon expérimental et du dispositif de mesure.

Dispositifs nécessaires et réalisation d'une campagne de mesures

La conductivité est mesurée avec un conductimètre portable constitué d'une sonde WTW Tetracon 325 avec 10 m de câble et d'un boîtier WTW 340i. Les données de conductivité sont transmises en continu et enregistrées au pas de temps d'une seconde par une centrale Aalbørn. La sonde a été placée verticalement dans l'écoulement au milieu de la section par l'intermédiaire d'un tube PVC couché le long de l'aqueduc donnant accès au collecteur. Un deuxième conductimètre peut être disposé au niveau du regard R2 d'injection de référence afin de contrôler le passage de l'injection de mesure. Le chlorure de sodium utilisé lors des expérimentations est celui utilisé pour le salage des routes. Au laboratoire, le sel est dissous dans de l'eau contenue dans une cuve (600 L). Afin d'accélérer la dissolution du sel dans la solution mère et d'homogénéiser la solution, une pompe électrique tournant en circuit fermé est utilisée pendant deux à trois heures. Des containers de 2, 5, 10 ou 20 litres de solution de traceur sont pesés en laboratoire, transportés sur le terrain à proximité du collecteur, vidés dans un seau et injectés manuellement au droit de la section d'écoulement. Les

solutions de traceur utilisées présentait une concentration en NaCl comprise entre 170 et 180 g/L, le volume d'une injection de mesure étant de 25 L et le volume d'une injection de référence étant de 4 L. Chaque campagne de mesure d'une durée d'environ 2 heures est constituée de 4 injections de référence et de 3 injections de mesure.

Résultats expérimentaux

Un exemple de courbe de restitution de traceur est illustré sur la Figure 5. Les 4 injections de référence et les 3 injections de mesure présentent des pics de conductivité du même ordre de grandeur entre 3500 et 4200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductivité de base, de l'ordre de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, est stable durant l'expérimentation. Aucun chevauchement n'est observé. Le taux d'exfiltration est calculé pour chaque injection de mesure en prenant en compte respectivement les deux injections de référence qui l'encadrent. Un taux d'exfiltration moyen est calculé pour chaque campagne de mesures avec une incertitude associée. Cette dernière comprend l'incertitude analytique sur une valeur de taux d'exfiltration qui est de l'ordre de 1 % et l'incertitude liée à la dispersion des six valeurs de taux d'exfiltration qui dépend essentiellement de la variabilité du débit d'eaux usées.

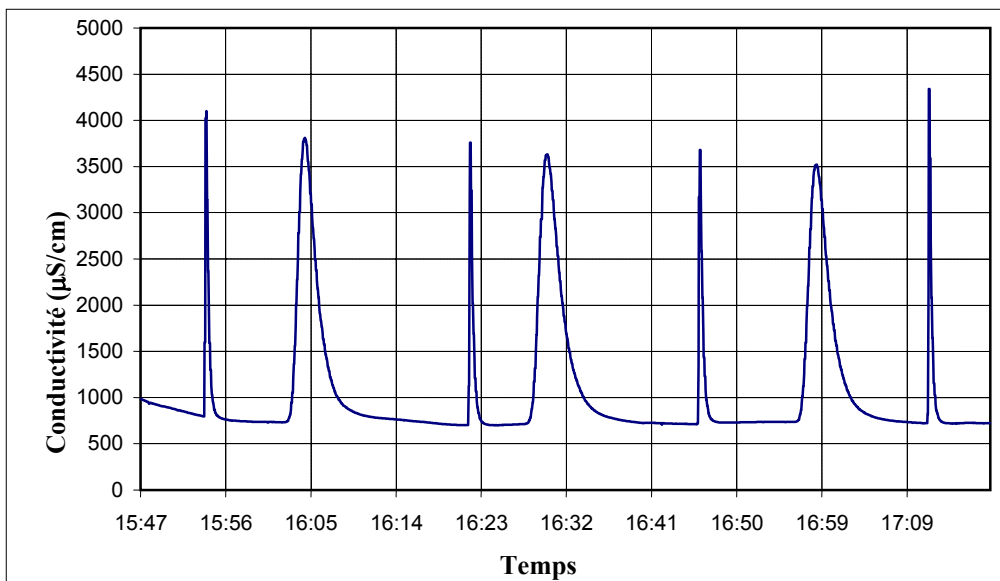


Figure 5: Exemple de courbe de restitution de traceur lors d'une campagne de mesures d'exfiltration (27/07/2003)

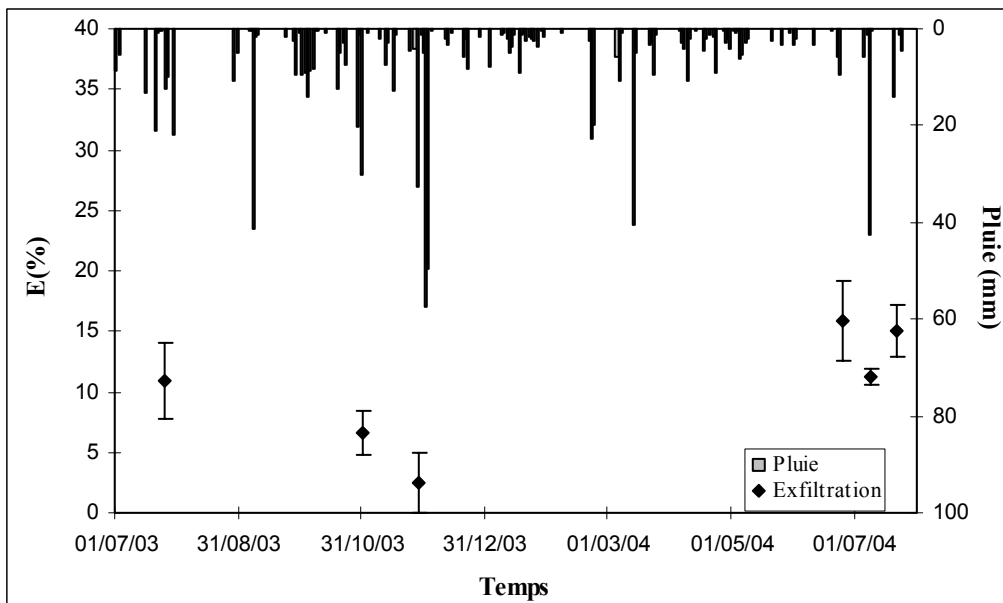


Figure 6: Résultats obtenus lors des six campagnes de mesures d'exfiltration sur le bassin versant d'Ecully.

Les résultats obtenus lors des six campagnes de mesures sont illustrés sur la Figure 6. Les taux d'exfiltration observés sont compris entre 2 % et 16 %. De manière générale, le taux d'exfiltration est marqué par des

effets de saisonnalité. Il diminue en période de hautes eaux et augmente en période de basses eaux. En juillet 2004, une variabilité événementielle a également été mise en évidence. En effet, suite à une pluie importante (40 mm), le taux d'exfiltration a diminué de 15 à 10 %. La variabilité de l'exfiltration pourrait être directement liée à la pluviométrie (fréquence et hauteur). Des expérimentations complémentaires seront nécessaires afin de confirmer ces hypothèses et de développer une approche de modélisation.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'application routinière de la méthode QUEST pour mesurer l'exfiltration d'effluents en réseaux d'assainissement par traçage artificiel au NaCl nécessite précautions et rigueur. Divers facteurs influent sur le bon déroulement de la mesure et l'obtention d'une courbe de restitution de traceur autorisant un calcul rigoureux du taux d'exfiltration. Ces différents facteurs sont liés d'une part au choix du linéaire de tronçon étudié et d'autre part à la variabilité des caractéristiques de l'effluent, principalement la conductivité et le débit d'eaux usées. La définition d'un scénario expérimental à partir des données acquises lors d'un essai préliminaire conduit à la finalisation d'un protocole expérimental qui permet de réaliser une campagne de mesure dans des conditions optimales. Les temps de résidence réels du traceur dans le bief de référence et de mesure sont utilisés pour définir l'instant auquel chaque type d'injection doit être réalisée de manière à obtenir des signaux de conductivité bien distincts. L'application de la méthode QUEST par différents utilisateurs sur des sites expérimentaux présentant des caractéristiques variées dans le cadre du programme de recherche européen APUSS permettra de mieux définir ses conditions d'emploi et de validité. Cependant, les expérimentations réalisées sur le bassin versant d'Ecully indiquent que la méthode doit être appliquée préférentiellement sur un linéaire de tronçon relativement court, de l'ordre du km, avec un débit d'eaux usées en amont de ce dernier suffisamment important pour assurer un écoulement correct des eaux sans zones mortes. Dans des conditions optimales, la méthode QUEST peut permettre de mesurer, avec une incertitude acceptable, de faibles taux d'exfiltration. Cependant un pourcentage d'eaux usées exfiltrées marquées par du NaCl ne permet pas d'apprécier un volume d'eaux usées exfiltrées et donc un impact potentiel sur la vulnérabilité du milieu récepteur car le débit d'eaux usées et les caractéristiques des défauts d'étanchéité varient le long du linéaire inspecté. Afin d'améliorer le potentiel de la méthode, nous proposons de réaliser une injection de référence en amont du tronçon inspecté au niveau du regard d'injection de mesure. Les injections de référence amont et aval sont alors utilisées pour estimer le débit d'eaux usées entrant et sortant du tronçon étudié. L'application du taux d'exfiltration mesuré à ces deux grandeurs fournirait une valeur minimale et une valeur maximale du débit d'exfiltration. Le principe du mesurage simultané du débit d'eaux usées et du taux d'exfiltration est décrit dans De Bénédictis (2004).

REFERENCES

- Bertrand-Krajewski J.-L., Laplace D., Joannis C., Chebbo G. (2000). *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*. Paris (France) : Editions Tec & Doc., 794 p.
- Decker J. (1994). *Wassergefährdung durch undichte Kanäle - Erfassung und Bewertung*. Aachen (Deutschland) : Institut für Siedlungswasserwirtschaft RWTH Aachen, BMFT Forschungsbericht.
- Daily J., Harleman D. (1966). *Fluid Dynamics*. Addison Wesley, 1966, 454 p.
- De Bénédictis J. (2004). *Mesurage de l'infiltration et de l'exfiltration dans les réseaux d'assainissement*. Thèse de Doctorat en Génie-Civil, INSA de Lyon, 330 p.
- EN 752-2 (1995). *Drain and sewer systems outside buildings - Part II: Performance requirements*. Brussels (Belgium) : European Committee for Standardisation.
- Härig F. (1991). Auswirkungen des Wasseraustausches zwischen undichten Kanalisationen und dem Aquifer auf das Grundwassersystem. PhD Thesis, Universität Hannover, Deutschland.
- Lerner D. (1990). Groundwater recharges in urban areas. *Atmospheric Environment*, 24(1), 29-33.
- Neitzke S. (2002). *Experimental evaluation of infiltration and exfiltration in sewer systems - Literature review and identification of experimental sites*. Villeurbanne (France) : INSA de Lyon, URG Hydrologie Urbaine, mémoire de DEA "Génie Civil", juillet 2002, 105 p + annexes.
- Rieckermann J. (2003). *Calibrated and tested methods and experimental protocols to accurately quantify exfiltration of wastewater from sewers. Description of a standard protocol to measure exfiltration from sewer systems using NaCl tracer*. Dübendorf (Switzerland) : EAWAG, APUSS Deliverable for the European Commission, June 2003, 8 p. (unpublished).
- Zacher B. (1994). *Entwicklung von verfahren zur Quantifizierung des Wasseraustrittes und der Wasser-Stoffausbreitung in der Umgebung undichter Kanäle*. Stuttgart (Deutschland) : Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Forschungsbericht BMFT-Forschungsvorhaben 02WA9038.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme de recherche européen APUSS (Assessing Infiltration and Exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems) associant : INSA de LYON (FR), EAWAG (CH), Technical University of Dresden (DE), Faculty of Civil Engineering at University of Prague (CZ), DHI Hydroinform a.s. (CZ), Hydroprojekt a.s. (CZ), Middlesex University (UK), LNEC (PT), Emschergerossenschaft (DE) et IRSA-CNR (IT). APUSS est financé par la Commission Européenne dans le cadre du 5ème PCRD. Contrat n° EVK1-CT-2000- 00072.