Procédure multicritère pour la conception et le suivi des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales

Moura P*., Barraud S*., Baptista M. **

** URGC Hydrologie Urbaine - INSA Lyon - Bâtiment J.C.A. Coulomb*
34 avenue des Arts - 69621 Villeurbanne Cedex - France

*** Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos - Escola de Engenharia da UFMG*
Av. Contorno, 842 - 80 Andar - 30110.060 - Belo Horizonte - MG – Brazil

priscilla.macedo-moura@insa-lyon.fr, sylvie.barraud@insa-lyon.fr, marbapt@ehr.ufmg.br

RÉSUMÉ. *Les systèmes d'infiltration sont utilisés pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Réduisant les débits de pointe et les volumes de ruissellement, ils permettent la diminution de la fréquence des inondations et contribuent à la recharge des nappes phréatiques. Ils présentent différentes formes et possibilités d'usages, toutefois leur performance est diverse et intègre multiples aspects. Par conséquent une approche multicritère pour quantifier les performances de ces systèmes et aider à la résolution des problèmes de décision est en cours de développement. A ce propos un jeu d'indicateurs de performance intégrant les aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux a été développé. L'article présente la dernière version du jeu d'indicateurs proposé ayant fait l'objet de tests de qualité : disponibilité de données, pertinence, fidélité, précision, sensibilité/robustesse.*

ABSTRACT. *Infiltration systems are used as an option to manage urban storm drainage. By reducing downstream flows and volumes, they decrease the overflows and make it possible to recharge groundwater. They come in various forms with different uses, therefore, their performance is diverse and integrates multiples aspects. Consequently, a multicriteria approach to quantify the performance of these systems and to help in decision making problems was developed. For that purpose, a list of performance indicators or criteria integrating technical, economical, environmental and social aspects were developed. The paper presents the last version of the performance indicators tested according to a set of quality requirements: availability of data, relevance, fidelity, precision, sensitivity/robustness.*

MOTS-CLÉS : *systèmes d'infiltration, indicateurs de performance.*

KEYWORDS: *infiltration systems, performance indicators.*

1. Introduction

Les systèmes d'infiltration sont fréquemment utilisés pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Ces techniques contribuent à la réduction des débits de pointe et des volumes de ruissellement. Elles permettent de diminuer la fréquence des inondations et contribuent à la recharge quantitative des nappes phréatiques. Enfin, elles offrent des potentialités importantes en terme de forme et des possibilités d'usages variés leur permettant de s'intégrer facilement dans le tissu social et dans le « paysage » urbain. Même si elles présentent de nombreux avantages, leur durabilité sur le long terme n'est pas certaine (Dechesne et al., 2004). La performance de ces systèmes est diverse et intègre non seulement les aspects techniques mais aussi des aspects environnementaux, économiques et sociaux. Par conséquent une approche multicritère pour quantifier les performances de ces systèmes et aider à la résolution des problèmes de décision est en cours de développement. Il s'agit de permettre aux décideurs d'adopter ou non des stratégies d'infiltration, d'évaluer un système d'infiltration à un moment donné, de le suivre dans le temps ou encore de comparer des variantes de projets ou de stratégies de gestion des systèmes. L'article présente la dernière version du jeu d'indicateurs proposé ayant fait l'objet de tests de qualité : disponibilité de données, pertinence, fidélité, précision, sensibilité/robustesse.

2. Considérations à propos de la construction d'un jeu d'indicateurs

La construction d'un jeu d'indicateurs nécessite en première phase une définition précise des objectifs (Qu'attend-on exactement du jeu d'indicateurs ?). Elle se poursuit par l'identification des critères ou indicateurs par type de performances et par l'évaluation de leur consistance. Elle se termine par l'analyse conjointe des indicateurs pris ensemble. Globalement, les principaux points de vue énoncés dans la littérature pour évaluer un jeu d'indicateurs doivent répondre aux questions : 1/Est ce que les indicateurs sont faciles à calculer et les données pour leur évaluation accessibles? 2/ Répondent-ils aux besoins ? 3/Sont-ils non ambigus ? 4/ Est-ce qu'ils présentent des erreurs acceptables et connues ? 5/Est-ce qu'ils présentent une bonne robustesse aux paramètres incertains mais une bonne sensibilité c'est-à-dire une bonne aptitude à discriminer des situations différentes ? 6/ Les échelles spatiales et temporelles sont-elles pertinentes ? 7/ Le jeu d'indicateurs ne présente-t-il pas un nombre trop grand d'indicateurs ?

3. Le jeu d'indicateurs

Un premier jeu d'indicateurs présentant 17 performances a été proposé par Barraud et al. (2001). Ce jeu d'indicateurs avait pour objectif de quantifier les performances des systèmes d'infiltration et comparer différentes stratégies. Toutefois l'analyse a posteriori et l'application du jeu d'indicateurs se sont avérées

problématiques. Cela nous a amené à reconsidérer ce jeu pour le compléter, l'étendre et/ou le modifier. Cette analyse nous a permis en outre de les scinder en deux parties différentes suivant que l'on répond à des problèmes de conception ou de gestion/suivi. Cette recherche s'appuie en outre sur des connaissances de différents domaines regroupés au sein d'un groupe de travail rassemblant des compétences en hydrologie, génie des procédés, science du sol, hydrobiologie des eaux souterraines, socio-économie. Le groupe comprend en outre des gestionnaires d'ouvrages.

Performance : Ne pas inonder gravement et trop souvent

Comme partie d'un système d'assainissement global, les systèmes d'infiltration présentent des risques directs (déversement d'un bassin d'infiltration) et indirects (déversement du réseau causé par un dysfonctionnement d'un dispositif d'infiltration). Pour la phase de conception deux indicateurs ont été proposés :

$$IP_{1\text{-}1}=F_{dim} \qquad \text{et} \qquad IP_{1\text{-}2}= \text{Max}\,(V_{debi}) \times k \qquad [1][2]$$

Pour le suivi d'un ouvrage en service ont été définis les indicateurs suivants :

$$IP_{1\text{-}1} = \frac{F_{deb}}{F_{dim}} \qquad [3]$$

Et $\begin{cases} \text{S'il y a débordement, } IP_{1\text{-}2_1} = \sum_i (V_{debi}), \quad IP_{1\text{-}2_2} = T_{deb} & [4][5] \\ \text{S'il n' y a pas débordement, } IP_{1\text{-}2_1} = \%\ T=NT<24h\ /\ NT & [6] \end{cases}$

Et $IP_{1\text{-}3} = D_{slp}$ [7]

F_{dim} : fréquence de dimensionnement, V_{debi} : volume débordé pendant un évènement i sur une période de référence (durée de vie estimée ou sur une période donnée), k : coefficient de vulnérabilité dépendant des surfaces touchées, F_{deb} : fréquence de débordement, T_{deb} : temps de débordement sur la période de référence, %T : pourcentage d'évènements ayant un temps de vidange < 24 heures sur le nombre total d'évènements sur la période de référence, D_{slp} : durée de fonctionnement sans lames d'eau persistantes

Performance : Permettre un bon état de la nappe

Cet indicateur a été modifié plusieurs fois. On trouvera dans Barraud et al. (2004) les versions précédentes et leurs biais méthodologiques. Pour la phase de conception la proposition actuelle considère l'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) sous l'ouvrage comme une indication du risque de pollution de la nappe.

S'il existe un ouvrage tel que ZNS <1 m alors IP_2= -1,

sinon $IP_2 = \sum S_{\inf - ZNS>5m} / S_{\inf}$ [8]

$\sum S_{\inf - ZNS > 5m}$ est la somme des surfaces d'infiltration des ouvrages dont la zone non saturée est supérieure à 5 m, $S_{\inf}$ est la somme totale des surfaces d'infiltration des ouvrages.

Pour la phase de suivi un indicateur binaire a été défini pour indiquer si le système fonctionne correctement ou non. Cet indicateur est basé sur le suivi métrologique en continu de la conductivité électrique et de l'oxygène dissous (OD) de la nappe (Perrodin et al., 2005). IP_2=0 si après un évènement pluvieux la conductivité électrique de la nappe ne décroît pas, ou s'il n'y a pas d'augmentation d'oxygène dissous (quand la nappe n'est pas saturée en OD) ou s'il y a une baisse en OD (quand la nappe est saturée en OD). IP_2=0 indique que le système présente un dysfonctionnement et que les causes du problème doivent être étudiées, sinon IP_2=1.

Performance : Contribuer à la recharge des nappes

Cet indicateur est calculé pour les phases de conception et de suivi comme suit :

$$IP_3 = V_{inf} / V_{plu} \qquad [9]$$

V_{inf} : volume infiltré par l'ouvrage, V_{plu} : volume précipité sur la zone à assainir.

Performance : Ne pas polluer l'air

Performance considérée avec les performances 10 et 11.

Performance : Ne pas polluer le sol en profondeur

Cette performance mesure l'aptitude du système d'infiltration à maintenir la pollution en surface. Pour la phase de conception, deux indicateurs ont été proposés, le premier indique une pression sur le sol (équation 10) et le deuxième est lié à la capacité du sol à piéger la pollution (Tableau 1).

$$IP_{6\text{-}1} = \frac{S_{inf\ i}}{S_{a\ i}} \times F_i \qquad [10]$$

$S_{inf\ i}$: surface d'infiltration, S_{ai} : surface du bassin versant, F_i : Facteur de pondération variant entre 1 et 3. F_i=1 pour des routes, parkings et zones industrielles, F_i=2 pour toitures avec pièces en métal, F_i=3 pour les pistes cyclables, les chemins piétons et les autres toitures.

Tableau 1. *Capacité du sol à retenir la pollution en surface – $IP_{6\text{-}2}$*

pH	Granulométrie du sol d'infiltration		
	Fine	Moyenne à grossière	Milieu fissurée
5<pH<8	élevée	moyenne	Infiltration non recommandé
pH<5ou pH>8	moyenne	faible	Infiltration non recommandé

Pour la phase de suivi deux indicateurs ont été proposés, Ils comparent la concentration en polluants du sol avec les valeurs cibles (indiquant une qualité de sol durable) et d'intervention (indiquant que les propriétés fonctionnelles du sol sont une menace pour la vie humaine, végétale et animale) prescrites dans les normes hollandaises (NMHSPE, 2000). Cette performance est basée en deux composantes K_1 et K_2 (Dechesne et al., 2004).

$$K_1 = \frac{\sum p_i}{\sum p_i}_{C_i < NH_{Ci}} \quad \text{et} \quad K_2 = \frac{\sum p_i}{\sum p_i}_{C_i > NH_{Ii}} \quad ; 0 \leq K1, K2 \leq 1 \qquad [11]$$

p_i : poids de toxicité du polluant i, C_i : concentration du polluant i dans le sol, NH_{Ci} et NH_{Ii} : valeur cible et d'intervention du polluant i selon les normes hollandaises

Cette définition implique que même si un seul polluant dépasse les valeurs d'intervention des normes hollandaises, toute la couche de sol est considérée comme polluée. Le facteur *x* est choisi pour l'usager entre 0 et 0.5. L'indicateur est défini selon deux sous-indicateurs :

$IP_{6\text{-}1}$=profondeur à laquelle le sol atteint une pollution faible ou nulle caractérisée par $K_1 \in [1-x, 1]$;

$IP_{6\text{-}2}$= pourcentage d'échantillons présentant une pollution importante ($K_2 > 0$).

Cet indicateur donne de bons résultats lorsqu'il est appliqué à des sites réels. Il est facile à estimer et il a surtout un pouvoir discriminant et explicatif important. Cependant la référence aux normes hollandaises ne font pas l'unanimité et d'autres pistes sont explorées à l'heure actuelle pour remplacer NH_{Ci} et NH_{Ii} (Normes « BRGM », sol témoin et incertitudes associées, mesure écotoxicité).

Performance : Aptitude à retenir la pollution dans l'ouvrage

L'indicateur sert aux phases de conception et de suivi. Il est associé à la capacité globale de rétention en polluant pour le système d'infiltration. La procédure proposée par Le Coustumer et al. (2005) est utilisée pour le calcul des masses.

$$IP_{7k} = \frac{Mp^k}{Map^k} \qquad [12]$$

Mp^k, Map^{pe}: masse piégée par l'ouvrage et masse apportée à l'ouvrage sur un période donnée (durée de vie, durée de référence).

Performance : Aptitude à être maintenable techniquement et facilement

L'aptitude à être maintenable facilement par l'organisation dépend de divers facteurs (accessibilité aux structures à maintenir, spécificité des équipements de maintenance, …). La maintenance des systèmes d'infiltration peut être plus ou moins

complexe selon leur statut légal (publique ou privé) ou leurs différents usages. Un premier indicateur basé sur un système de notation faisant intervenir les matériels utilisés, la facilité et la contrôlabilité de l'entretien a donné des résultats peu fiables (Barraud et al, 2004) mettant en évidence un manque de connaissances et de savoir-faire des services pour ce type d'ouvrages. A l'heure actuelle, des interviews sur sites conduites par des sociologues sont en cours, corrélativement à la recherche sur les modes d'entretien les plus adéquats compte tenu des connaissances nouvellement acquises sur le fonctionnement diachronique de ces ouvrages. .

Performances : Ne pas compromettre la santé et la sécurité des usagers/personnels

Les indicateurs proposés peuvent être appliqués aux phases de conception et de suivi. Pour l'aspect sanitaire lié au sol, l'indicateur se base sur la concentration moyenne en polluant mesuré sur les 30 premiers centimètres du sol. Cette performance est définie à partir de deux composants, K_3 et K_4. Le premier est lié au pourcentage de polluants qui présentent une concentration inférieure aux valeurs seuils (VCI_{US}) et l'autre représente le pourcentage de polluants qui ont une concentration supérieure aux valeurs seuils (VCI_{UNS}).

$$K_3 = \%\left[C_{mesi} \leq VCI_{USi}\right] \quad \text{et} \quad K_4 = \%\left[C_{mesi} \geq VCI_{UNSi}\right] \qquad [13]$$

C_{mesi} : Concentration mesurée du polluant i, VCI_{USi} : Valeur constat d'impact usage sensible pour le polluant i (BGRM, 2000).

$$\text{Si } K_3 = 100\% \Rightarrow IP_{10-1} = 1$$
$$\text{Si } K_3 < 100\% \Rightarrow IP_{10-1} = K_1 \text{ mais, si } K_4 > 0\% \Rightarrow IP_{10-1} = 0$$

Pour l'aspect sanitaire lié à l'air, nous proposons un indicateur basé sur :

$$K_5 = \%\left[\frac{C_{mesi}}{C_{limi}} > \alpha\right] \qquad [14]$$

C_{mesi} : concentration mesurée du polluant i, C_{limi} : concentration limite du polluant i, α : valeur seuil. Pour les usagers C_{limi} est fixée par l'OMS (OMS, 2000).

Si $\left[\frac{C_{mesi}}{C_{limi}} > 1\right]$ alors $IP10_{-2}$ = important, si K_5>50% alors IP_{10-2} = moyenne et si $K_5 \leq 50\%$ alors IP_{10-2} = peu important.

Pour le personnel on utilise le même formulation de l'IP_{10-2}, mais en considérant l'exposition à l'air et au sol conjointement. L'indicateur considère alors les valeurs limites d'exposition de l'INRS (INRS, 2005).

Performance : Avoir un coût peu élevé

Le coût est un facteur important dans la phase de conception. En phase de suivi, il peut être utile de suivre les coûts annuels d'entretien et d'intervention, on peut alors se servir de la définition donnée à l'$IP_{12\text{-}2}$.

$$IP_{12\text{-}1} = \frac{C_{inv} + C_{etude}}{Vs} \quad \text{et} \quad IP_{12\text{-}2} = \frac{C_{main}}{Vs} \qquad [15][16]$$

C_{inv} : coût d'investissement, $C_{maint\ j}$: coût annuel actualisé dépendant du mode de gestion prévu, D : durée de vie ou durée de référence estimée, Vs : volume utile de stockage.

Autres performances

Pour un certain nombre d'autres performances, des définitions ont été données ou sont en cours de construction. Pour certaines performances, les indicateurs ne sont pas de bonne qualité (manque de pertinence, de robustesse ou de sensibilité principalement ou même parfois d'accessibilité des données). Les performances elles-mêmes doivent probablement être ré-etudiées et regroupées. C'est le cas de la Performance 4 (Ne pas épuiser les ressources naturelles), 9 (Ne pas compromettre le fonctionnement d'autres ouvrages), 13 (aptitude au développement de la zone), 14 (Aptitude à être adaptable à l'évolution des besoins) et 15 (Aptitude à assurer d'autres fonctions et usages). D'autres performances sont parfaitement identifiées mais la connaissance est trop peu assise pour pouvoir émettre un quelconque indicateur. C'est le cas de la performance 16 (Aptitude à être acceptée socialement) et 17 (Aptitude à produire des déchets facilement gérables). Dans un cas comme dans l'autre un travail de fond s'avère nécessaire et mobilise de la recherche dans différents domaines (socio-économiques, génie des procédés, …) pour ces performances. Bénéficiant d'un groupe de travail pluridisciplinaire et de site d'observations instrumentés (OTHU), ces aspects devraient à terme trouver des réponses.

5. Conclusion

Dans cet article la dernière version du jeu d'indicateurs pour l'évaluation des systèmes d'infiltration a été présentée. La liste complète n'est pas encore disponible. La proposition d'un jeu d'indicateurs est une tâche ardue et interactive et qui dépend d'une expertise multidisciplinaire. Les conditions sont cependant regroupées pour que ce travail aboutisse dans les plus brefs délais (site d'observation, association de gestionnaires et d'équipes de recherche disciplinaires travaillant sur les mêmes sites, projets de recherche communs (Ecopluies – PRECODD- ANR)). Le travail de définition des indicateurs terminé, il s'agira ensuite de tester leur pertinence au

travers de leur intégration au sein de méthodes d'aide multicritère à la décision prenant en compte les incertitudes nombreuses et importantes de certains indicateurs.

Remerciements

Les auteurs remercient le RGCU pour le financement de cette action intégrée au projet MGDinfiltration, l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine) pour le soutien scientifique et enfin la direction de l'Eau du Grand Lyon pour la mise à disposition de sites de mesures et d'informations.

6. Bibliographie

Barraud S., Bardin J.P., Alfakih E., Abdelmalki L. Construction d'indicateurs de performances techniques, économiques et environnementales des ouvrages d'infiltration. Ministère de la Recherche – Action Concertée Incitative Ville, Rapport final, 2001.

Barraud S., Miramond M., Alfakih E. "Critical analysis of the quality of a set of performance indicators used to qualify sustainability of urban infiltration storm water drainage systems". *4th International Conference on Decision Making in Urban & Civil Engineering*. Porto, Portugal, October 28-30, 2004, 10 p in [CD-ROM].

BRGM. Gestion des sites (potentiellement) pollués. Version 2, 2000.

Dechesne M., Barraud S., Bardin J.P. "Indicators for hydraulic and pollution retention assessment of stormwater infiltration basins". *Journal of Environmental Management* 71(4), 2004.

INRS. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. Note Documentaire. Institut National de Recherche et Sécurité, 2005. Disponible à <www.inrs.fr>.

Le Coustumer S., Barraud S., Béranger Y. " Procédure de mesure et proposition de modélisation des flux d'eau et des polluants au sein des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain ". *Revue Européenne de Génie Civil*, (*In press*).

NMHSPE. Circular on Target Values and Intervention Values for Soil Remediation, The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2000. Disponible en <http://www.vrom.nl/>.

OMS. Air quality guidelines for Europe, 2000. Disponible à <http://www.euro.who.int/air>.

Perrodin Y., Barraud. S., Gibert J., Gourdon R., Delolme C., Winiarski T., Bedell J.-P., Desjardins V., Bardin J.P., Bacot L. Programme MGD infiltration : Maîtrise et gestion durable des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain, Rapport final. Ministère de la Recherche : Réseau Génie Civil & Urbain, 2005, 144 p.