
PRECODD - Programme ECOtechnologies et Développement Durable



Programme ECOPLUIES

Techniques alternatives de traitement des eaux pluviales et de leurs sous-produits : vers la maîtrise du fonctionnement des ouvrages d'infiltration urbains

Projet ANR-05-ECOT-006

Délivrable D-D1

Rapport sur les indicateurs
et sur les méthodes de constructions d'indicateurs
de performances des ouvrages d'infiltration
(Etape 1)

Responsable du rendu :

S. Barraud – P. Moura – F. Cherqui ,
Part. 1 – INSA VALOR – INSA Lyon LGCIE ,
34 av. des Arts, 69621 Villeurbanne Cedex, France

Juin 2007

SOMMAIRE

1	RAPPEL DU CONTEXTE ET DES BASES DE TRAVAIL	2
1.1	RAPPELS DES OBJECTIFS :.....	2
1.2	DEFINITION DE LA NOTION D'INDICATEURS	2
1.3	DELIMITATION DU CONTOUR DES SYSTEMES TECHNIQUES ETUDIES ET ECHELLES CONSIDEREES.	2
1.4	DEFINITION DE LA FINALITE DES INDICATEURS ET DES ACTEURS A QUI SONT DESTINES LES INDICATEURS.....	2
1.5	GROUPE DE TRAVAIL.....	3
1.6	QUALITES REQUISES POUR LES INDICATEURS.....	3
2	PERFORMANCES CONSIDEREES	4
3	DEFINITION DES INDICATEURS DE CONCEPTION EN PHASE DE CONCEPTION.....	5
3.1	PROTEGER CONTRE LES INONDATIONS	5
3.2	RETENIR LA POLLUTION DANS L'OUVRAGE (NE PAS DEGRADER LA QUALITE DE LA NAPPE / NE PAS POLLUER LE SOL EN PROFONDEUR)	8
3.3	CONTRIBUER A LA RECHARGE DES NAPPES	11
3.4	PRESERVER LES RESSOURCES NATURELLES.....	11
3.5	ETRE MAINTENABLE TECHNIQUEMENT ET FACILEMENT PAR L'ORGANISATION	11
3.6	GARANTIR LA SANTE ET LA SECURITE DES USAGERS/PERSONNELS	12
3.7	PRODUIRE DES DECHETS FACILEMENT GERABLES.....	14
3.8	AVOIR UN COUT PEU ELEVE	14
3.9	QUALITE DE L'AMENAGEMENT.....	15
4	PHASE DE SUIVI.....	16
4.1	PROTEGER CONTRE LES INONDATIONS	16
4.2	NE PAS DEGRADER LA QUALITE DE LA NAPPE.....	16
4.3	RETENIR LA POLLUTION DANS L'OUVRAGE (NE PAS POLLUER LE SOL EN PROFONDEUR)	17
4.4	PRESERVER LES RESSOURCES NATURELLES.....	20
4.5	ETRE MAINTENABLE TECHNIQUEMENT ET FACILEMENT PAR L'ORGANISATION	20
4.6	GARANTIR LA SANTE ET LA SECURITE DES USAGERS/PERSONNELS	21
4.7	PRODUIRE DES DECHETS FACILEMENT GERABLES.....	23
4.8	AVOIR UN COUT PEU ELEVE	23
4.9	ACCEPTABILITE SOCIALE D'UN SCENARIO	23
5	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	24
6	REMERCIEMENTS.....	25
7	REFERENCES.....	25

1 RAPPEL DU CONTEXTE ET DES BASES DE TRAVAIL

1.1 Rappels des objectifs :

La tâche fait suite aux travaux réalisés dans le cadre du RGPU (Perrodin et al., 2005). Elle consiste à élaborer des indicateurs de performances pour le développement d'un service durable de l'assainissement pluvial par infiltration. Ce travail doit permettre d'évaluer une solution de rétention – infiltration et de comparer plusieurs stratégies ou l'évolution d'une même stratégie au cours du temps. Cette évaluation est multicritère ; elle intègre des critères techniques, environnementaux et socio-économiques et elle est basée sur les points de vue des acteurs intervenant dans la vie de ces stratégies depuis sa planification, jusqu'à la mort des infrastructures (décideurs, hommes d'études (concepteurs, exploitants et opérateurs) et usagers).

1.2 Définition de la notion d'indicateurs

Nous avons retenu la définition de l'IFEN (2000) qui considère un indicateur comme : « *quelque chose qui simplifie l'information en provenance de phénomènes complexes et qui la quantifie de manière à la rendre significative à l'échelle désirée* ». Nous avons complété cette définition en ajoutant qu'un indicateur doit en outre être muni d'une « structure de préférence » de manière à pouvoir refléter une tendance exploitable compte tenu du problème traité, ce qui le dissocie d'un simple descripteur. Par exemple, si l'on juge la qualité des eaux sortant d'un système par un indicateur lié à la couleur, il faut que l'on soit capable d'identifier si la couleur est « satisfaisante », « plus satisfaisante » que telle autre, etc.

1.3 Délimitation du contour des systèmes techniques étudiés et échelles considérées.

Les systèmes étudiés ont été définis comme étant un ouvrage ou un aménagement comprenant ou nécessitant des systèmes de retenue/infiltration.

L'échelle d'espace considérée est donc l'échelle locale d'une opération.

L'échelle de temps pertinente retenue est tout ou partie de la vie d'un ouvrage ou de celle d'un aménagement.

1.4 Définition de la finalité des indicateurs et des acteurs à qui sont destinés les indicateurs.

Les finalités identifiées sont :

- d'évaluer si l'infiltration est possible ou non avant la conception ;
- d'évaluer un ouvrage, une situation, un aménagement à un moment donné ;
- de suivre dans le temps un ouvrage, une situation, un aménagement (comparaison à différentes phases de la vie)
- de comparer des variantes
 - de projets (en conception) ;
 - d'actions de gestion sur un ouvrage ou un aménagement ;
 - d'actions sur la structure d'un ouvrage ou un aménagement.

Les comparaisons se font donc à « environnement » sensiblement similaire. Ainsi les indicateurs ne sont pas destinés à comparer deux opérations complètement différentes l'une à Lille, l'autre à Lyon par exemple.

Les acteurs destinataires de ces indicateurs sont les « décideurs » (maîtres d'ouvrage), les « hommes d'étude » (concepteurs, exploitants, opérateurs).

A la lumière de cette formulation, plusieurs niveaux d'indicateurs peuvent être établis, ils concernent :

- la faisabilité d'une stratégie d'infiltration. Dans cette phase, les données sont très peu précises, les aménagements ne sont pas arrêtés, les ouvrages ne sont pas

dimensionnés. Des indicateurs ont été proposés antérieurement et publiés (Barraud et al., 2006). Nous ne les traiterons donc pas ici.

- la conception (objets projetés)
- le suivi (objets existants potentiellement observables).

1.5 Groupe de travail

La démarche a consisté à réunir un groupe de travail pluridisciplinaire sur le thème. Ce groupe de travail a rassemblé des chercheurs de différents domaines partenaires du projet et des acteurs opérationnels (services de collectivités publiques et bureaux d'études privés)

Pour élaborer les performances puis les indicateurs, un groupe de travail a été constitué, il est censé représenter différents points de vue. Il est complété par la consultation de personnes complémentaires.

Nom par ordre alphabétique	Organisme	Compétences
Barraud S.	INSA URGC –Lyon	Recherche – hydrologie urbaine– aide à la décision
Cherqui F.	INSA URGC –Lyon	Recherche - Aide à la décision
Clozel B.	BRGM	Recherche – pollution des sols
Debecdelievre L.	INGEDIA	Opérationnel – assainissement- bureau d'études
Desjardin V.	insa-lyon - LAEPSI	Recherche – Génie des procédés
Gaboriau h.	BRGM	Recherche– Science du sol
Herbreteau B.	univ-lyon1 LSA	Recherche – Chimie
Malard F.	univ-lyon1 HBES	Recherche - hydrobiologie
Marotte P.	univ-lyon1 LSA	Recherche – Chimie
Michel S.	INGEDIA	Opérationnel – assainissement- bureau d'études
Moura P.	INSA URGC –Lyon	Recherche – hydrologie urbaine– aide à la décision
Perrodin Y.	ENTPE L.S.E	Recherche – science du sol - écotoxicologie
Seron A.	BRGM	Recherche– Science du sol
Siegler B.	univ-lyon1 LSA	Recherche – Chimie
Soares I.	Grand Lyon	Opérationnel – gestionnaire/Bureau d'étude de collectivité
Toussaint J.-Y.	insa-lyon (développement urbain)	Recherche – Sociologie
Varnier J.-C.	Grand Lyon	Opérationnel – gestionnaire/Bureau d'étude de collectivité
Verjat J.-L.	Burgeap	Opérationnel - Hydrogéologie

Les propositions d'indicateurs sont initiées soit sur des bases bibliographiques, soit à partir des recherches du programme soit encore *in abstracto* par le chercheur coordonnateur ou par un membre du groupe. L'ensemble des propositions est ensuite soumis au groupe pour discussion, modification, re-définition.

1.6 Qualités requises pour les indicateurs

Chaque proposition d'indicateur est ensuite testée sur des cas concrets et passer au crible de critères de qualité. Ces critères de qualité sont issus des travaux de Labouze et al. (1995) et figurent au Tableau 1.

Qualités requises / définition	Qui teste ces qualités et comment
Pertinence : capacité à refléter toute la signification d'un concept ou tous les aspects d'un phénomène et à garder sa signification dans le temps	La pertinence est validée par le groupe
Accessibilité : aptitude à être calculable facilement à un coût acceptable	L'accessibilité est validée qualitativement par les membres du groupe puis vérifiée par le chercheur coordonnateur qui évalue l'indicateur sur des cas concrets avec des données fournies par les opérationnels
Fidélité : conservation d'un biais à un niveau constant sur les unités spatio-temporelles de référence	La fidélité et l'objectivité sont validées par le chercheur coordonnateur qui fait évaluer les indicateurs par plusieurs évaluateurs
Objectivité : aptitude à donner une tendance qui ne dépend pas de l'évaluateur	
Précision/robustesse : fiabilité de l'évaluation avec une erreur acceptable / aptitude à donner une même tendance malgré les incertitudes sur l'évaluation	La précision/robustesse est testée par le chercheur coordonnateur qui évalue les incertitudes ou les sources de méconnaissance et qui applique la définition à des cas concrets
Sensibilité : aptitude à discriminer des solutions	La sensibilité est testée par le chercheur coordonnateur qui choisit des cas concrets que l'on veut discriminer et on applique l'indicateur pour savoir s'il est capable de discriminer correctement des différents cas
Univocité : aptitude à donner une valeur interprétable de manière univoque	L'univocité est testée a priori au moment de la définition de l'indicateur par le chercheur coordonnateur et le groupe

Tableau 1. Liste des qualités requises dans la méthode de travail et rôle des partenaires dans le travail de test

2 PERFORMANCES CONSIDEREES

Les performances ou objectifs poursuivis pour l'évaluation des systèmes d'infiltration prennent en compte les performances techniques qui reflètent le fonctionnement adéquat du système technique, performances environnementales et sanitaires et les performances socio-économiques, qui évaluent les coûts et les enjeux sociaux de ces systèmes. Comme nous considérons deux objectifs principaux : la conception de ces ouvrages et leur suivi les performances seront présentés séparément.

Lors d'études précédentes les indicateurs avaient été classés par famille : indicateurs techniques, environnementaux, socio-économiques. Cette distinction a été supprimée car certains indicateurs étaient liés et cette classification avait tendance à cloisonner et à masquer les interdépendances (la recharge de nappe par exemple n'est intéressante que si l'eau de recharge est de bonne qualité).

Tableau 2 – Facteur de pondération par type d'occupation du bassin versant

Liste des performances	Prise en compte en conception	Prise en compte en suivi
Protéger contre les inondations	X	X
Ne pas dégrader la qualité de la nappe		X
Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas dégrader la qualité de la nappe / Ne pas polluer le sol en profondeur)	X	X
Contribuer à la recharge des nappes	X	
Préserver les ressources naturelles	X	X
Etre maintenable techniquement et facilement par l'organisation	X	X
Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels	X	X
Produire des déchets facilement gérables	X	X
Avoir un coût peu élevé	X	X
Qualité de l'aménagement	X	
Acceptabilité sociale d'un scénario		X

3 DEFINITION DES INDICATEURS DE CONCEPTION EN PHASE DE CONCEPTION

3.1 Protéger contre les inondations

Objectifs :

Cette performance reflète l'objectif premier d'un ouvrage d'infiltration : assainir une zone déterminée en la protégeant contre des inondations et en protégeant les biens et les personnes sur cette zone. Cependant, la protection ne peut être totale, elle fera donc référence au risque pris lors de la conception des systèmes.

Considérations générales :

Le problème de la quantification du risque d'inondation n'est pas nouveau. On peut trouver dans la littérature de très nombreuses études concernant cet aspect. Plusieurs générations de méthodes ont fait évoluer la construction des indicateurs de risque d'inondation. Selon Hauger et al. (2006), originellement, les indicateurs de risque d'inondation n'ont considéré que l'aléa, sans prendre en compte les caractéristiques de l'occupation du sol. Progressivement le risque a intégré les conséquences physiques de l'aléa comme les hauteurs de submersion par exemple. Cependant ces notions se sont montrées insuffisantes car ne prenant pas en compte la vulnérabilité des surfaces touchées. En effet une hauteur de submersion de 50 cm sur un parking ne présente pas le même risque que dans une cours de maternelle un jour de semaine par exemple.

Ainsi la notion de risque d'inondation a t-elle évoluée vers la définition qui est aujourd'hui couramment admise c'est-à-dire celle de la conjonction de l'aléa et de la vulnérabilité d'une zone. La vulnérabilité intégrera, suivant le problème traité, la sensibilité des « entités » touchées (type d'habitation et d'habitants, matériel utilisé dans les constructions, existence de routes alternatives aux routes inondées...). Nous retiendrons donc pour notre part cette dernière conception du risque.

Point de vue adopté pour la définition des indicateurs :

La performance hydraulique d'une variante de projet est d'autant meilleure que :

- la fréquence de débordement prise en compte pour le dimensionnement est élevée
- le volume maximum et le volume moyen débordé pour un évènement sur la durée de vie estimée n'est pas trop important
- la vulnérabilité des zones touchées ne sont pas trop importantes

Définitions des indicateurs

$$IC_{HYD1} = F_{dim} \quad (\text{Équation 3.1})$$

Sens de préférence : Plus IC_{HYD1} est élevé meilleure est la performance

F_{dim} : Fréquence de dimensionnement

Et

$$IC_{HYD2} = \text{Max}(V_{debi}) \times k \quad (\text{Équation 3.2})$$

Sens de préférence : Plus IC_{HYD2} est faible meilleure est la performance

V_{debi} : volume maximal débordé pendant un évènement i sur une période de référence dans le bassin versant,

k : coefficient de vulnérabilité dépendant des surfaces touchées compris entre 0 et 1

Et

$$IC_{HYD3} = \overline{V_{debi}} \quad (\text{Équation 3.3})$$

Sens de préférence : Plus IC_{HYD3} est faible meilleure est la performance

$\overline{V_{debi}}$: volume moyen débordé pendant un évènement i sur une période de référence à un endroit donné

Considération pour leur évaluation :

La fréquence de dimensionnement (IC_{HYD1}) est une donnée établie par le concepteur, c'est donc un choix de conception.

Par contre pour l'estimation (IC_{HYD2} et IC_{HYD3}), des simulations doivent être utilisées pour estimer les indicateurs d'importance des débordements. Nous préconisons les simulations proposées dans le travail de Magali Dechesne (Dechesne, 2002).

En ce qui concerne la vulnérabilité des zones touchées de nombreuses approches ont pu être développées. Globalement les approches sont soit basées sur la notion de risque accepté, comme pour la méthode *Inondabilité* (Gilard, 1998), soit sur la vulnérabilité économique estimée par les pertes financières directes voire indirectes liées aux dommages créés par les inondations, soit encore sur une approche probabiliste associant une probabilité d'occurrence à un effet adverse identifié (comme étudié par Penning Rowsell et al. (2005), qui estime la perte de vies humaines causées par des inondations)

Dans notre cas aucune des trois approches présentées n'est vraiment applicable. La méthode *Inondabilité* sert à une région bien définie et ne peut pas être extrapolée, les méthodes qui utilisent les pertes financières nécessitent également que soient définies de manière fine les activités. Or les indicateurs proposés dans le présent travail doivent présenter un caractère général et facilement calculable lors d'une étude de conception.

Nous nous orientons donc vers une approche plus simple, qui lie la vulnérabilité d'une zone aux activités prévues sur cette zone.

Actuellement la liste des activités est en cours de validation, aussi bien que leur poids respectifs qui serviront à l'estimation des paramètres k_i . Cependant pour estimer ces poids de manière cohérente, nous nous sommes basés sur la méthode des valeurs propres (ou AHP - Analytic Hierarchic Process) développée par Saaty (1977). Notons que cette méthode n'a pas été développée pour servir directement de méthode de notation comme nous le faisons ici. Elle a été construite à l'origine comme méthodes de pondération utilisable lors d'analyses multicritères.

Pour évaluer les poids des activités w_i , nous les comparons ces activités deux à deux. Nous obtenons ainsi une matrice V carrée de dimension n appelée matrice de comparaisons binaires, où n est le nombre d'activités. Le remplissage de la matrice se fait en associant une valeur v_{ij} lors de la comparaison des activités deux à deux. Dans notre cas, par exemple, lorsque l'on compare une activité i à une activité j , la note v_{ij} peut prendre la :

1 : si l'activité i présente le même niveau de vulnérabilité que l'activité j
 3 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité légèrement plus important que l'activité j
 5 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité beaucoup plus important que l'activité j
 7 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité indiscutablement beaucoup plus important que l'activité j

1 / 3 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité légèrement moins important que l'activité j
 1 / 5 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité beaucoup moins important que l'activité j
 1 / 7 : si l'activité i présente un niveau de vulnérabilité indiscutablement moins important que l'activité j

Notons que d'autres systèmes de valuation peuvent être utilisés.

Le Tableau 3 montre un exemple de matrice de comparaisons binaires pour la vulnérabilité liée au type d'occupation.

Tableau 3 – Matrice de comparaisons binaires

	Voirie	Parking	Habitat	Parc, square, chemin piéton	Industrie à risque	Industrie à faible risque	Eq. d'accueil au public
Voirie	1	3	1/5	1	1/7	1/5	1/7
Parking	1/3	1	1/5	1	1/7	1/5	1/7
Habitat	5	5	1	5	1	1	1/3
Parcs, squares, chemins piétons	1	1	1/5	1	1/7	1/5	1/7
Industrie à risque	7	7	1	7	1	5	1
Industrie à faible risque	5	5	1	5	1/5	1	1/3
Equipements d'accueil au public	7	7	3	7	1	3	1

On peut constater que la matrice V de comparaisons binaires est non symétrique mais réciproque

Si le décideur (l'expert qui remplit la matrice) est cohérent, ce que ne suppose pas a priori la méthode, alors un certain nombre de propriétés doivent être vérifiées comme la transitivité par exemple ($v_{ij} = v_{ji} = (w_i / w_j) = (w_i / w_k) * (w_k / w_j) = v_{ik} * v_{kj} = \dots$)

On constate alors que la propriété $V \cdot \vec{w} = n \cdot \vec{w}$ est vérifiée si bien que si l'expert est cohérent alors on montre que n est aussi la plus grande valeur propre de V.

$$V \cdot \vec{w} = \begin{bmatrix} w_1 / w_1 & w_1 / w_2 & \dots & w_1 / w_n \\ w_2 / w_1 & w_2 / w_2 & \dots & w_2 / w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n / w_1 & w_n / w_2 & \dots & w_n / w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \cdot \vec{w}$$

Pour s'assurer de sa cohérence, on laissera l'expert remplir la matrice V, on calculera la plus grande valeur propre λ_{max} de la matrice V et on s'assurera qu'elle est proche de n (c'est-à-dire le nombre d'activités à juger). Pour juger de cette proximité à n on calcule un taux d'incohérence :

$CI = \frac{|\lambda_{max} - n|}{n - 1}$ que l'on compare un taux maximal d'incohérence appelé coefficient d'incohérence aléatoire CIA (obtenu pour des matrices V construites de manière complètement aléatoire) et dont il existe des valeurs pour différentes valeurs de n. Si le rapport $\frac{CI}{CIA}$ est inférieure à 10% on considère que l'expert est cohérent.

A titre d'exemple pour la matrice donnée au Tableau 3 le taux d'incohérence calculé est de 0,05, Ce qui est satisfaisant. Les poids associés à la vulnérabilité de chaque type d'occupation sont alors ceux donnés au Tableau 4.

Tableau 4 – Matrice de comparaisons binaires

Type d'occupation du sol	Poids
Voirie	0.04
Parking	0.03
Habitat	0.17
Parcs, squares, chemins piétons	0.03
Industrie à risque	0.29
Industrie à faible risque	0.13
Equipements d'accueil au public	0.30

3.2 Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas dégrader la qualité de la nappe / Ne pas polluer le sol en profondeur)

Objectifs

Cette performance doit refléter la capacité du système d'infiltration à ne pas détériorer la qualité de la nappe et à ne pas laisser la pollution pénétrer trop en profondeur de manière à ce qu'on puisse facilement l'extraire.

Considérations générales

Il est très difficile notamment en phase de conception de caractériser l'aptitude potentielle qu'aura le sol à retenir la pollution. D'après les recherches publiées et les expérimentations en cours, trois facteurs majeurs sont souvent identifiés comme prépondérants : l'épaisseur de la zone non saturée sous l'ouvrage (qui va servir de filtre), les caractéristiques du sol en place et la pression exercée par le bassin versant sur la surface d'infiltration.

La zone non saturée est en effet un point important. Il existe une limite à la faisabilité des ouvrages d'infiltration (>1m) et il existe des études qui montrent que plus la zone non saturée est grande et plus la protection de la nappe vis-à-vis des apports d'eau de ruissellement est importante (Datry, 2003), il n'existe par contre aucune valeur seuil autre que le seuil de faisabilité. On peut alors considérer que plus cette zone est importante, meilleure est l'aptitude du sol à retenir la pollution.

En ce qui concerne les caractéristiques de sol, les paramètres à considérer, si l'on se réfère à la littérature et notamment à la synthèse bibliographique de Laetitia Citeau (2006), sont la vitesse d'infiltration, le pH et la capacité d'échange cationique. Une faible vitesse d'infiltration favorise la rétention des polluants, le temps de contact entre les polluants et les éléments du sol étant plus long. En revanche, une vitesse élevée risque d'entraîner les polluants. Dechesne (2002) constate par exemple que des bassins d'infiltration qui possèdent de fortes conductivités hydrauliques présentent aussi des fronts de pollution plus profonds que les autres en ce qui concernent les métaux lourds. La vitesse d'infiltration minimale recommandée pour les systèmes d'infiltration est généralement située aux alentours de 10^{-6} m/s, la vitesse maximale d'infiltration pour qu'il n'existe pas de transfert de polluant dans les couches plus profondes du sol est de l'ordre de 10^{-3} m/s (Barraud et al., 2006).

Le risque peut également venir de l'existence de chemins préférentiels présents dans les sols contenant une quantité importante de limons fins ou d'argiles ou qui possèdent des structures grossières comme le fluvio-glaciaire. Barbosa (2000) recommande par exemple de ne pas utiliser des sols ayant une teneur en argile supérieure à 10 % et une teneur en limons fins supérieure à 25% dans les sols.

Le pH est un paramètre qui contrôle le processus de sorption des polluants par le sol. C'est la raison pour laquelle on recommande souvent un pH « pas trop acide ». Il existe bien quelques valeurs guides en phase de faisabilité ou d'admissibilité (par exemple celles de l'OFEFP, 2002) qui préconise des pH du sol superficiel de plus de 5.5 au minimum et si possible de plus de 6.5, mais là encore rien n'est donné pour évaluer la plus ou moins grande performance. Comme aucune valeur n'est fournie, nous avons proposé d'utiliser comme limites en phase avec les experts en science du sol du groupe de travail un pH compris entre 5 et 8.

De même la capacité d'échange cationique est d'autant plus favorable qu'elle facilite les échanges entre les polluants et le sol c'est à la dire que sa valeur est grande.

Enfin la pression exercée par le bassin versant sur la surface d'infiltration doit être la plus petite possible.

Point de vue adopté pour la définition des indicateurs

La performance vis-à-vis de la qualité de la nappe et la rétention de la pollution par le sol au moment de la conception sera jugée d'autant meilleure :

- que la nappe est protégée par une zone non saturée importante sous les ouvrages composant le système et
- que l'aptitude du sol à retenir la pollution est grande. Cette aptitude peut-être caractérisée par un pH compris entre 5 et 8, une capacité d'échange cationique la plus grande possible, une vitesse d'infiltration pas trop élevée c'est-à-dire supérieure à 10^{-4} m/s (Formulation 1) ou directement par un essai sur le sol (Formulation 2) et
- que la pression exercée sur les surfaces d'infiltration par le bassin versant est faible.

Définitions des indicateurs

a) Indicateur de protection de la nappe : épaisseur de zone non saturée (ZNS)

$$IC_{NS1} = ZNS \quad (\text{Équation 3.4})$$

Sens de préférence : Plus IC_{NS1} est grand, meilleure est la performance

ZNS : épaisseur la plus faible (en m) de la zone non saturée sous le dispositif d'infiltration dans la zone à aménager. On considérera en outre qu'une ZNS <1m ne sera pas possible.

b) Indicateur d'aptitude du sol à la rétention des polluants

Formulation 1

La première formulation reprend les caractéristiques du sol

Le pH

$$\text{Si } 5 \leq pH \leq 8 \quad IC_{NS2} = 1 ; \text{ sinon } IC_{NS2} = 0 \quad (\text{Équation 3.5})$$

Sens de préférence : $IC_{NS2} = 1$ indique une performance meilleure que si $IC_{NS2} = 0$

pH : pH du sol sous l'ouvrage, dans la zone à aménager

La capacité d'échange cationique (CEC)

$$IC_{NS3} = CEC \quad (\text{Équation 3.6})$$

Sens de préférence : Plus IC_{NS3} est grande, meilleure est la performance

CEC : plus faible capacité d'échange cationique (en meq/100mg) du sol sous l'ouvrage, dans la zone à aménager

La vitesse d'infiltration (V_i)

La vitesse d'infiltration recommandée pour les sols des ouvrages d'infiltration se situe entre : 10^{-6} et 10^{-4} m/s.

$$\text{Si } 10^{-7} \leq V_i \leq 10^{-4} \quad \text{alors } IC_{NS4} = \frac{10^{-4} - V_i}{10^{-4} - 10^{-7}}$$

$$\text{Sinon } IC_{NS4} = 0 \quad (\text{Équation 3.7})$$

Sens de préférence : Plus IC_{NS4} est proche de 1, meilleure est la performance

V_i : plus importante vitesse d'infiltration du sol (en m/s) sous l'ouvrage d'infiltration, dans la zone à aménager

Formulation 2

La formulation 2 consiste à remplacer les conditions de pH et de CEC par un essai

L'essai proposé consiste à mesurer la capacité d'absorption de polluants pour le sol ou les sols relatifs à différents points d'infiltration sur une zone. Le sol est prélevé à la profondeur du fond du futur ouvrage ou des futurs ouvrages. Un essai en batch est ensuite réalisé. Un échantillon de sol de 5 g tamisé à 2 mm est plongé dans 50 mL¹ d'eau additionnée de polluants en concentration connue et proche des concentrations moyennes rencontrées dans

¹ Ratio masse de sol/volume d'eau recommandé par USEPA
ANR PRECODD – Programme Ecopluis – Délivrable D-D1

les eaux de ruissellement. La solution est agitée pendant toute la période de l'essai. Au bout d'un temps t de l'ordre de 5 h la concentration de polluants dans l'eau est mesurée. La différence de concentration permet d'estimer la capacité de rétention de polluants dans le sol. Cet essai n'a bien entendu aucune valeur pour quantifier de manière intrinsèque l'aptitude d'un sol à retenir les polluants in situ. Par contre il permet des comparaisons (entre deux localisations sur une zone par exemple). S'il existe pour un même scénario, différents ouvrages, on retiendra le cas le plus défavorable.

c) Indicateur de pression anthropique

L'indicateur de pression anthropique vise à prendre en compte la pression exercée sur les surfaces d'infiltration par le bassin versant, en considérant le type d'occupation du bassin versant et l'efficacité des systèmes de prétraitement projeté.

$$IC_{PR} = \text{Min}_i \left(\frac{S_{inf_i}}{S_{ai}} \times F_i \right) \quad (\text{Équation 3.8})$$

Sens de préférence : Plus IC_{PR} est grand, meilleure est la performance

S_{inf_i} : surface d'infiltration

S_v : surface du bassin versant

F_i : Facteur de pondération

Les facteurs de pondérations F_i font à l'heure actuelle l'objet d'étude notamment par méthode AHP (Cf paragraphe 3.1.) et en calant les coefficients sur des jugements d'experts (Cf. Tableau 5). Ces facteurs sont cependant provisoires et vont évoluer dans les prochains mois.

Tableau 5 – Facteur de pondération par type d'occupation du bassin versant

Type d'occupation	Facteur de pondération
Vies cyclables, chemins piétons, etc	1
Habitat	60
Industrie	100
Route	150

Considérations pour l'évaluation des indicateurs

Actuellement les indicateurs sont en cours de test.

La formulation 1 liée à la définition des indicateurs à l'aide des caractéristiques de sol ne nous semble pas excellente.

En ce qui concerne le pH, les limites proposées ne nous satisfont pas et le recours à la CEC du sol initial non plus. L'application de cette fourchette à des bassins de l'Est lyonnais tendrait à montrer sur ce point une piètre aptitude à retenir la pollution alors que les mesures réalisées tendent à prouver le contraire. Il en est de même pour la CEC. En fait, dès les premières années de leur fonctionnement, les structures d'infiltration reçoivent des sédiments qui modifient grandement les caractéristiques de la couche superficielle du sol. Or, cette couche va commander à terme l'aptitude à retenir la pollution.

L'indicateur de pression anthropique n'est, lui non plus, pas validé. La connaissance du type d'urbanisme ou d'activité sur une zone urbaine donné ne suffit pas à prévoir les concentrations ou les masses de polluants qui seront générés par les événements pluvieux (Chocat et al., 2007). De plus l'efficacité des systèmes de prétraitement doit être prise en considération. Ces indicateurs sont donc amenés à évoluer.

3.3 Contribuer à la recharge des nappes

Objectifs et considérations générales

Un des avantages à utiliser des systèmes d'infiltration est la recharge des nappes, ils peuvent compenser la réduction de d'infiltration due à l'urbanisation. Cependant, cette performance est liée à la précédente « permettre un bon état de la nappe » car, en effet, la recharge d'une nappe n'est un avantage que si l'eau infiltrée est de bonne qualité.

Notons que cette performance n'est pas majeure car la contribution à la recharge de nappe est généralement minimale à l'échelle d'un ouvrage ou d'une opération d'aménagement. Cependant cela constitue un point positif.

Point de vue adopté pour la définition des indicateurs

La contribution à la recharge de la nappe est d'autant meilleure que les quantités d'eau qui s'infiltrent représente une part importante des quantités précipitées sur la zone d'aménagement et que l'eau infiltrée n'est pas susceptible de polluer la nappe.

Définitions de l'indicateur

Si l'indicateur de qualité de nappe n'est pas trop mauvais :

$$IC_{NAPPE} = V_{inf} / V_{plu} \quad (\text{Équation 3.9})$$

Sinon

$$IC_{NAPPE} = 0 \quad (\text{Équation 3.10})$$

Sens de préférence : Plus IC_{NAPPE} est grande, meilleure est la performance

V_{inf} : volume total infiltré par l'ouvrage, ou ensemble des ouvrages d'un aménagement

V_{plu} : volume total précipité sur la zone à assainir

3.4 Préserver les ressources naturelles

Cette performance concerne la consommation de matériaux et d'énergie nécessaires tout au long du cycle de vie d'un ouvrage de sa conception à sa mort. Pour arriver à proposer des indicateurs il est nécessaire de faire un bilan des matières utilisées pour la construction et la maintenance de ces dispositifs. L'état des connaissances ne nous permet même pas, pour l'instant, de trancher sur la pertinence de cette prise en compte.

Actuellement nous analysons sur certains sites les ressources utilisées (consommation de combustibles fossiles lors de la construction de ces ouvrages, consommation en énergie électrique, ...).

3.5 Etre maintenable techniquement et facilement par l'organisation

Cette performance a pour but d'estimer la facilité d'entretien d'un système d'infiltration. Son caractère subjectif rend la tâche compliquée. Plusieurs indicateurs ont été proposés (Barraud et al., 2001) mais tous ont échoué car trop dépendants de l'évaluateur (Barraud et al., 2004). Nous avons donc repris le travail de manière plus qualitative. Dans un premier temps, nous avons dressé un inventaire des différents types de techniques et des tâches d'entretien nécessaires en collaboration avec des gestionnaires. Enfin à l'aide de la méthode AHP (Cf. § 3.1) appliquée par différents gestionnaires nous comptons une fois de plus affecter une pondération des techniques les unes par rapport aux autres. Elle sera validée par plusieurs évaluateurs.

Nous avons travaillé essentiellement à l'identification des tâches de maintenance par chaque type d'ouvrage. L'information constituée est la suivante et est en cours de validation.

Bassins secs avec revêtement planté

Curage du bassin, pour le cas des bassins de rétention, une fois par an. Entretien des espaces verts, tous les 6 mois. Nettoyage des ouvrages de prétraitement : curage des dessableurs une fois par an, nettoyage des régulateurs de débit une fois par an, enlèvement des flottants des séparateurs à hydrocarbures deux fois par an et nettoyage complet une fois par an. Dans le cas des bassins d'infiltration remplacement de la couche de surface tous les 15 ans.

Bassins secs avec revêtement minéral

Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté. Grattage de la surface (pour les bassins sans géotextile) une fois par an. Désherbage, du fond et des berges du bassin, une fois par an. Remplacement de la couche de surface tous les 15 ans.

Bassins secs avec revêtement étanche (pour les BR en amont des BI)

Curage du bassin une fois par an. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté.

Bassin en eau avec berges plantées

Entretien des espaces verts, tous les 6 mois. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté.

Bassin en eau avec berges minérales

Désherbage des berges du bassin une fois par an. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté.

Bassin enterré

Curage du bassin une fois par an. Nettoyage des ouvrages de prétraitement comme pour les bassins secs avec revêtement planté.

Chaussées avec enrobé drainant

Nettoyage des dispositifs (orifices, paniers, dispositifs d'épuration,...), curage des regards et des avaloirs, assez fréquemment, mais très variables selon la région (Azzout et al, 1994); en moyenne tous les 6 mois (MEE, 1994). Hydrocurage avec aspiration une fois par an. Comme entretien curatif, fraisage de la surface avec thermo recyclage de l'enrobé, dès que la surface est colmatée.

Chaussées avec enrobé étanche

Nettoyage des dispositifs (orifices, paniers, dispositifs d'épuration,...), curage des regards et des avaloirs, tous les 6 mois (MEE, 1994).

Fossés et noues sans cloisons

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, tous les 6 mois (UPRCT, 2004). Entretien des espaces verts, avec arrosage pendant les périodes sèches. Remplacement de la couche de terre végétale colmatée, comme entretien curatif, quand le système présente de problèmes de dysfonctionnement (Azzout et al, 1994).

Fossés et Noues avec cloisons

Nettoyage des dispositifs annexes, nettoyage des orifices, tous les 6 mois (UPRCT, 2004). Entretien des espaces verts, avec arrosage pendant les périodes sèches. Remplacement de la couche de terre végétale colmatée, comme entretien curatif, quand le système présente de problèmes de dysfonctionnement (Azzout et al, 1994).

Puits avec revêtement planté

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, tous les mois (Azzout et al, 1994). Entretien des espaces verts tous les mois. Curage ou pompage curatifs tous les 5 ans (Azzout et al, 1994).

Puits avec revêtement minéral

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, tous les mois (Azzout et al, 1994). Curage ou pompage curatifs tous les 5 ans (Azzout et al, 1994).

Puits avec revêtement étanche

Nettoyage des dispositifs annexes : regard de décantation, déshuileurs, chaque mois (Azzout et al, 1994). Curage ou pompage curatifs tous les 5 ans (Azzout et al, 1994).

Tranchées avec revêtement planté

Nettoyage des dispositifs annexes : regards, paniers, décanteurs, déshuileurs, chaque mois. Entretien des espaces verts, chaque mois.

Tranchées avec revêtement minéral

Nettoyage des dispositifs annexes : regards, paniers, décanteurs, déshuileurs, chaque mois.

Tranchées avec revêtement étanche

Nettoyage des dispositifs annexes : regards, paniers, décanteurs, déshuileurs, chaque mois.

3.6 Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels

Objectifs et considérations générales

La santé et sécurité des personnes liées aux ouvrages d'infiltration sont très souvent négligées, cependant nous devons nous poser la question des risques d'accidents liés à ces systèmes. Les risques d'accidents sont principalement liés à la structure des systèmes.

Point de vue adopté pour la définition des indicateurs

La performance du système est d'autant meilleure qu'il n'est pas dangereux structurellement et fonctionnellement. Le danger concerne :

- le type de systèmes (une tranchée est moins dangereuse pour toutes les activités qu'une noue, qui elle-même est moins dangereuse qu'un bassin par exemple) ;
- la conception même des systèmes (un bassin profond aux berges escarpées est plus dangereux qu'un bassin de faible profondeur dont l'évacuation a été « réfléchi » (escaliers, rampes, ...))

Nous avons trois types principaux de techniques : les fossés/noues, les tranchées/structures réservoirs d'infiltration et les bassins.

Les fossés et noues peuvent présenter des différences de conception et de protection liées à leur accès (pente des talus, présence ou non de garde corps, ...)

Les tranchées, les puits et les structures réservoirs d'infiltration et les chaussées présentent un risque peu important en terme de sécurité puisque les équipements sont non accessibles et même non visibles la plupart du temps.

Les bassins sont les systèmes qui peuvent avoir le plus de différences de conception. Les bassins peuvent être fermés ou bien ouverts au public. Le danger peut être ou non signifié aux usagers (panneau d'information signalant la montée des eaux). Cette signalisation va être plus ou moins utile suivant que le bassin est localisé dans une zone facilement ou difficilement accessible.

Par ailleurs les bassins peuvent présenter plus ou moins de danger suivant que le système possède ou non i) des dispositifs de protection des entrées et des sorties d'eau (par exemple des grilles qui empêchent que les personnes rentrent dans le réseau d'arrivée d'eau, ii) des protections des organes hydrauliques (pompes, régulateurs par exemple) iii) des entrées d'eau réparties, ce qui réduit les risques entraînés par une vitesse d'arrivée d'eau. La sécurisation de l'ouvrage passe également par la réduction des risques de noyade lié à la plus ou moins grande facilité d'évacuation du bassin (berges de faible pente (au maximum de 1:3), indication de chemins de sortie, escaliers facilement accessibles...). De même quand un bassin est en eau permanente, les pentes des berges doivent permettre à des personnes tombées dans l'eau accidentellement de sortir facilement (pente d'au maximum de 1 :4).

L'ensemble des techniques et des dispositifs de sécurisation ont été répertoriés (Cf. Figure 1). Les solutions sont comparées pour être classée par méthode AHP.

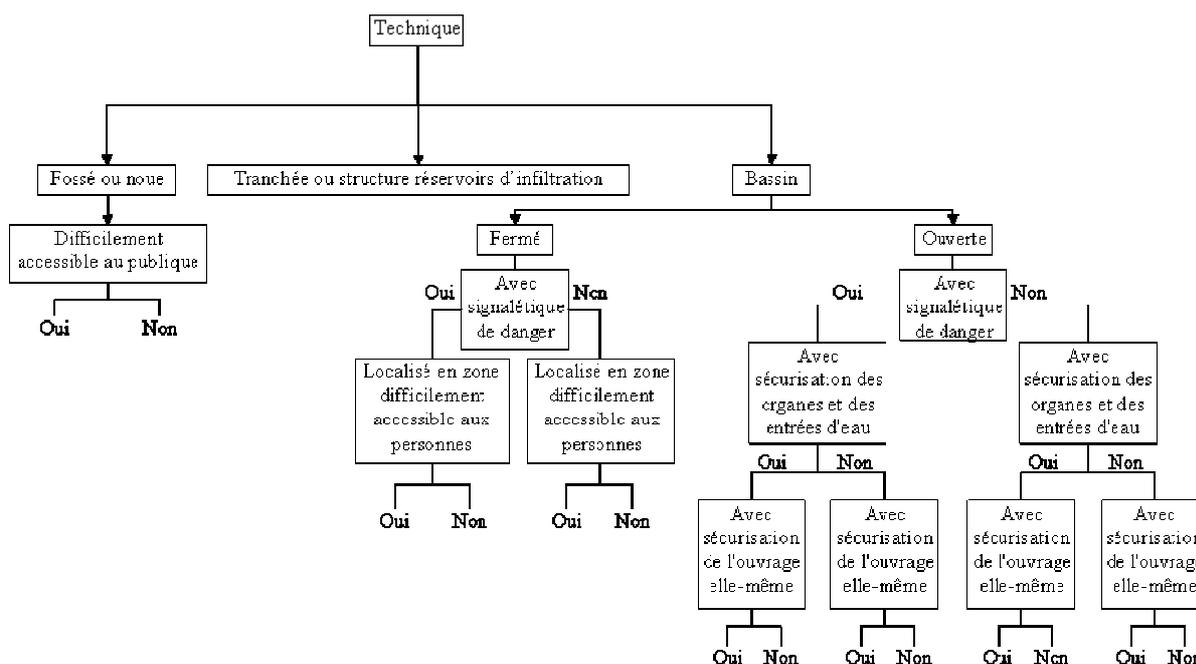


Figure 1 – Différentes techniques d'infiltration et les considérations de sécurité associées

Définition de l'indicateur

Actuellement la validation des variantes de techniques est en cours. Suite à leur validation la méthode des valeurs propres (Cf. § 3.1) va être appliquée afin de hiérarchiser les variantes de techniques.

3.7 Produire des déchets facilement gérables

Les déchets retirés lors du curage des systèmes d'infiltration sont constitués de sols chargés de fines particules avec une pollution importante et en quantité non négligeable. Ces déchets sont donc difficiles et coûteux à traiter. La facilité de traitement est donc un aspect primordial. Elle est reliée directement aux études en cours sur la caractérisation et la traitabilité des ces déchets.

Cette performance va être d'autant meilleure que les quantités à traiter sont : faibles et faciles à traiter et / ou à recycler.

Actuellement cette performance n'a pas d'indicateur proposé, nous attendons des résultats préliminaires de l'Atelier B - Amélioration des procédés de gestion des résidus de curage (pré-traitement) pour la définition de l'indicateur.

3.8 Avoir un coût peu élevé

Objectifs et point de vue adopté

La performance « économique » est d'autant meilleure que le système présente un coût d'investissement, d'études préalables et de maintenance prévisionnelle peu élevés.

Définition des indicateurs

$$IC_{COUT1} = Ci + Ce \quad \text{(Équation 3.11)}$$

$$IC_{COUT2} = VAN(C_m) \quad \text{(Équation 3.12)}$$

Sens de préférence : Plus les valeurs des indicateurs sont faibles, meilleure est la performance

Ci : coût d'investissement

Ce : coût des études préalables

VAN(C_m) : Valeur actuelle nette des coûts de maintenance basée sur la vie utile de l'ouvrage

Le Tableau 6 répertorie les études préalables à mener pour l'implantation de chaque type de technique d'infiltration.

Tableau 6 - Liste des études à effectuer in situ, par type de technique (Azzout, 1996)

Technique	Etudes
Bassin d'infiltration	Perméabilité en plusieurs endroits, études géologiques, géotechniques et hydrogéologiques
Chaussée	Perméabilité superficielle et de la portance
Fossé ou noue	Perméabilité superficielle
Puits	Perméabilité en profondeur
Tranchée	Perméabilité superficielle

Pour les chaussées, les études de la portance ne sont pas liées à l'infiltration, c'est la raison pour laquelle elles ne sont pas considérées.

3.9 Qualité de l'aménagement

Objectifs et point de vue adopté

Un système d'infiltration des eaux pluviales peut assurer diverses fonctions, en gardant sa fonction principale d'assainissement. Ces systèmes peuvent avoir des fonctions de loisirs, comme des terrains de sport, squares, parcs, vélodromes, entre autres... Ils peuvent aussi avoir une simple fonction d'aménagement paysagé...ou aucune autre fonction que la fonction d'« assainissement pluvial).

Les systèmes d'assainissement peuvent, en général, être plus ou moins bien perçus pour les usagers ou riverains. Pour l'instant les études nous amènent à penser que l'acceptation sociale d'un système d'infiltration est justement liée aux autres fonctions que ces systèmes possèdent. Par ailleurs il semble que l'acceptabilité sociale d'un système soit également, et on le comprend, lié à ces performances techniques. Si un système est techniquement performant son acceptabilité sociale va être d'autant mieux assurée. De même, si un système est bien entretenu il va être mieux accepté. Cela est confirmé par un sondage fait en Angleterre (HR Wallingford, 2006) sur la perception sociale des SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems). Les points positifs identifiés des ces systèmes sont l'augmentation de leur valeur « récréationnelle », l'amélioration du paysage et sa fonction de réduction du risque d'inondation.

Cependant, même si la multi-fonction est considérée en général comme un plus, encore faut-il que les usages supplémentaires soient conformes aux souhaits de l'aménageur ou du décideur. Pourquoi dirait-on qu'un bassin d'infiltration servant de terrain de football serait meilleur qu'un bassin purement hydraulique s'il existe déjà des terrains de sport à proximité ?

Définition des indicateurs

L'indicateur va donc évaluer l'aptitude d'un aménagement à répondre à d'autres usages souhaités. Nous proposons donc un indicateur qualitatif marquant le fait qu'un aménagement, un ouvrage :

- va tout à fait dans le sens des souhaits du maître d'ouvrage / aménageur
- apporte un plus selon les souhaits du maître d'ouvrage / aménageur
- dont la plurifonctionnalité n'a aucune importance
- ne va pas du tout dans le sens des souhaits du maître d'ouvrage / aménageur

Actuellement cet indicateur est en cours de validation.

4 PHASE DE SUIVI

4.1 Protéger contre les inondations

Objectifs

La performance de protection contre les inondations pour le suivi des systèmes peut être utile à deux niveaux : au niveau du système global et au niveau d'un ouvrage particulier.

Point de vue adopté

La performance hydraulique du système est d'autant meilleure que la fréquence de débordement de l'aménagement ou de l'ouvrage est proche de celle qui a présidé à son dimensionnement et que le système ne se colmate pas trop vite.

Le premier point de vue est purement factuel et constate un dysfonctionnement, le second est plus prospectif puisqu'il indique une tendance avant même que les dysfonctionnement ne se soient produits.

Définitions des indicateurs

- **Indicateur de fréquence de débordement**

$$IS_{HYD3} = \frac{F_{deb}}{F_{dim}} \quad (\text{Équation 4.1})$$

Sens de préférence : Plus IC_{HYD3} est faible, meilleure est la performance

Fdim : Fréquence de dimensionnement,
Fdeb : Fréquence de débordement observé

Cependant il est important de vérifier, après un débordement s'il a été causé par un événement exceptionnel, de temps de retour supérieur au temps de retour de dimensionnement. Dans ce cas il ne doit pas être pris en compte lors du calcul de l'indicateur.

- **Suivi de la performance hydraulique d'un ouvrage particulier**

Point de vue adopté : la performance hydraulique d'un ouvrage est d'autant meilleure qu'il ne se colmate pas trop vite.

$$IP_{HYD4} = R \quad (\text{Équation 4.2})$$

Sens de préférence : Plus IC_{HYD4} est faible, meilleure est la performance

R est la résistance hydraulique global de l'ouvrage au sens du modèle de Bouwer

On peut dire qu'un système qui présente une résistance hydraulique supérieur à 24h est un système en dysfonctionnement.

A ce jour les indicateurs ont été testés et ont présenté des résultats satisfaisants (Cf Délivrable D-A2).

4.2 Ne pas dégrader la qualité de la nappe

Objectifs

Cette performance doit refléter le fait que le système d'infiltration ne doit pas détériorer la qualité de la nappe.

Considérations générales

Les eaux de ruissellement pluvial sont généralement faiblement minéralisées (conductivité électrique inférieure à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et saturées en oxygène dissous. Malgré une forte variabilité régionale de la composition physico-chimique des nappes phréatiques, les eaux souterraines présentent généralement une minéralisation bien supérieure à celle des eaux de ruissellement pluvial.

De nombreuses nappes phréatiques sont également sous-saturées en oxygène dissous, à l'exception des nappes phréatiques profondes surmontées par une zone non saturée épaisse (> 10 m). Lors des épisodes pluvieux, l'écoulement des eaux de ruissellement pluvial doit donc générer dans la nappe à l'aplomb des bassins d'infiltration un nuage d'eau faiblement minéralisée et oxygénée.

La performance sera jugée correcte si les mesures sont effectuées en continu par sonde multiparamètre² en aval de la nappe se comportent « normalement ».

Dans des conditions de mesure satisfaisantes (c'est à dire piézomètre de suivi recoupant effectivement le panache d'eau pluviale) :

- l'absence d'une baisse de conductivité dans la nappe ou l'augmentation de la conductivité de la nappe phréatique est un signe de dysfonctionnement dont il s'agira d'étudier les causes (par exemple déversement accidentel ou régulier d'eau usée, augmentation excessive de la minéralisation des eaux d'infiltration dans le sol). Nous nommerons cette situation : situation A.
- l'absence d'une hausse de la concentration en oxygène dissous (dans le cas d'une nappe sous-saturée en oxygène dissous) ou la baisse de la concentration en oxygène dissous dans une nappe saturée en oxygène dissous est également un signe de dysfonctionnement dont il s'agira d'étudier les causes (par exemple consommation excessive d'oxygène dissous provenant de l'oxydation de matières organiques véhiculées par les eaux de ruissellement ou retenues au sein de l'interface ouvrage / sol). Nous nommerons cette situation : situation B.

La mesure de la conductivité électrique et de l'oxygène dissous relève d'une approche globale qui permet à moindre coût d'évaluer le bon fonctionnement d'un système d'infiltration. Répétée au cours de la vie d'un ouvrage, cette mesure doit également permettre de détecter une dérive du fonctionnement. Elle doit être perçue par l'utilisateur comme une mesure de type « témoin lumineux » dont les résultats dicteront la nécessité de déclencher des études plus précises afin d'expliquer des anomalies observées. Cette mesure ne se substitue pas aux nécessaires prélèvements d'eau de nappe qui seuls permettront de révéler la présence éventuelle de polluants apportés par l'infiltration des eaux de ruissellement pluvial.

Définition des indicateurs

Si l'on se trouve dans la situation A ou B alors IS_{NAPPE} indiquera « un *fonctionnement anormal à surveiller et à analyser plus finement* ». Dans ce cas $IS_{NAPPE} = 0$, sinon IS_{NAPPE} indiquera « un *fonctionnement attendu à surveiller normalement* » et $IS_{NAPPE} = 1$.

Sens de préférence : Un indicateur de 1 indique une meilleure situation qu'une valeur de 0.

Notons que l'on reprend ici l'indicateur défini antérieurement dans (Perrodin et al., 2005), les tests de cet indicateur ayant donné de résultats satisfaisants.

4.3 Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas polluer le sol en profondeur)

Objectifs :

Cette performance est censée refléter le fait que le système d'infiltration est d'autant plus performant qu'il piège une bonne partie de la pollution, la retient le plus en surface possible et sur une étendue de sol la plus faible possible pour des raisons de facilité d'entretien et de non contamination des sols en profondeur.

² Sonde de mesure comprenant au minimum : l'oxygène dissous et la conductivité
ANR PRECODD – Programme Ecopluiés – Délivrable D-D1

Point de vue adopté :

La performance était jugée d'autant meilleure que :

- l'efficacité des systèmes de prétraitement (s'ils existent) est grande ;
- la pollution dans l'ouvrage d'infiltration est faible, superficielle et peu étendue.

Définition et test des indicateurs

- **Indicateur d'efficacité des systèmes de prétraitement**

$$IS_{PTk} = \frac{M_p^k}{M_a^k} \quad (\text{Équation 4.3})$$

Sens de préférence : Plus IS_{PTk} est fort, meilleure est la performance

M_p^k : masse de polluant k piégée par l'ouvrage d'infiltration sur une période donnée (durée de vie, durée de référence)

M_a^k : masse de polluant k apportée à l'ouvrage d'infiltration sur la même période

Ces masses de matières en suspension doivent être obtenus par mesures en continu des entrées et sorties des systèmes de prétraitement (Cf. Délivrable D-A1).

La question du polluant à considérer est posée. Nous nous orientons vers le contrôle des MES uniquement.

- **Indicateur de contamination du sol**

Considérations générales et recherches antérieures

La performance «Retenir la pollution dans l'ouvrage (Ne pas polluer le sol en profondeur) » qui auparavant était « Ne pas polluer le sol » reflète deux aspects importants : la profondeur au delà de laquelle le sol est considéré comme pollué et l'importance de cette pollution. Une première formulation (A) a été proposée selon deux indicateurs (Barraud et al, 2001) :

$$IS_{SOL1}^A = z_{lim} / \forall z > z_{lim} \Rightarrow T_{sol}(z) < T_{ref} \quad \text{et} \quad IS_{SOL2}^A = \frac{T_{sol}}{T_{ref}} \quad (\text{Équation 4.4})$$

$T_{sol}(z)$: la teneur en polluant du sol à la profondeur z sous l'ouvrage d'infiltration ; T_{ref} : la teneur en polluant de référence choisie pour caractériser un sol « propre ».

Cette proposition présentait deux problèmes. Le premier était l'agrégation des différents polluants mesurés. On peut utiliser en ce sens une moyenne pondérée, toutefois un effet de compensation entre les différents polluants risquait de se présenter. Le deuxième problème était la définition de la teneur de référence. Elle avait été définie comme la teneur en polluant d'un sol témoin ou la teneur en polluant acceptée par la réglementation. Cette formulation (A) a été appliquée à quatre bassins en utilisant une agrégation par moyenne et comme teneur de référence la valeur cible selon la norme hollandaise (NMHSPE, 2000). Le Tableau 7 montre que l' IS_{SOL1}^A n'arrivait effectivement pas à discriminer les différents bassins dont on sait par ailleurs qu'ils présentent des fonctionnements très différents (sensibilité insuffisante).

Une deuxième formulation (B) a alors été proposée (Dechesne, 2002). Elle est basée sur deux composants K_1 et K_2 définis comme suit :

$$K_1 = \frac{\sum_{C_i < NH_{Ci}} p_i}{\sum p_i} \quad \text{et} \quad K_2 = \frac{\sum_{C_i > NH_{Ni}} p_i}{\sum p_i} \quad 0 \leq K_1, K_2 \leq 1 \quad (\text{Équation 4.5})$$

p_i : poids de toxicité du polluant i selon les normes relatives aux eaux potables, C_i : concentration du polluant i dans le sol, NH_{Ci} et NH_{Ni} : valeur cible et d'intervention du polluant i selon les normes hollandaises. Le premier correspond à la valeur de concentration du polluant i en deçà de laquelle le sol présente une pollution très faible proche de celle d'un sol naturel, le deuxième indique que les propriétés du sol sont fortement altérées et présentent un danger important.

Les deux indicateurs sont : IS_{SOL1}^B : profondeur à laquelle le sol atteint une pollution faible ou nulle caractérisée par $K_1 \in [I - x, I]$ où x est seuil d'exigence défini par l'usager et IS_{SOL2}^B : le pourcentage d'échantillons présentant une pollution importante ($K_2 > 0$).

Cette formulation (B) permet de ne pas agréger des valeurs de concentrations mais des poids, ce qui résout le problème d'agrégation. Cependant elle ne résout pas la question du sol de référence. Nous avons utilisé les valeurs des normes hollandaises en faisant l'hypothèse que si une concentration était considérée comme dangereuse en Hollande, elle devait l'être également en France (surtout pour les valeurs d'intervention pour lesquelles il n'y avait pas d'équivalents français). Excepté ces problèmes, les résultats de l'application aux quatre bassins donnent des résultats corrects (Cf. Tableau 7). Les indicateurs discriminent correctement des situations différentes. Le bassin de la ZAC des Pivolles, par exemple, présente une pollution plus profonde (>90 cm) mais plus localisée ($IS_{SOL2}^B=22\%$) que le bassin du Centre Routier.

Cependant le groupe d'experts du programme a contesté deux faits : d'une part le recours aux normes hollandaises et d'autre part le recours aux pondérations différenciées par polluant. L'utilisation des pondérations n'était effectivement pas judicieuse dans la mesure où l'importance de la dangerosité d'un polluant était déjà traduite par des seuils de concentrations plus bas. Nous avons donc utilisé des pondérations unitaires. Pour les concentrations seuils nous avons utilisé les recommandations françaises en matière de sols pollués même si elles ne sont pas tout à fait dans l'esprit des valeurs seuils définies dans l'indicateur précédent.

Test de nouvelles définitions

Ainsi une nouvelle proposition a été faite en s'inspirant de la précédente. Deux composantes K_1 et K_2 sont à nouveau définies.

$$K_1 = \frac{\#cas[C_{mesi} \leq NH_{Ci}]}{\#_{totpol}} \text{ et } K_2 = \frac{\#cas[C_{mesi} \geq NH_{li}]}{\#_{totpol}}; 0 \leq K_1 \leq 1 \text{ et } 0 \leq K_2 \leq 1 \quad (\text{Équation 4.6})$$

$\#cas$: nombre de polluants pour lesquels le cas entre [] se présente ; $\#_{totpol}$: nombre total de polluants ; C_{mesi} : concentration du polluant i mesuré dans le sol ; NH_{Ci} : concentrations de polluants d'un sol témoin ; NH_{li} : concentration de polluants à partir desquelles le sol est considéré comme source de pollution obtenue à partir de la recommandation française (BRGM, 2000).

Les deux indicateurs sont : IS_{SOL1}^C qui représente toujours la profondeur à laquelle le sol atteint une pollution faible et IS_{SOL2}^C le pourcentage d'échantillons présentant une pollution importante ($K_2 > 0$). Cette formulation a été appliquée au quatre bassins tests. Elle résout sur le principe définitivement le biais de l'agrégation, toutefois IS_{SOL1}^C ne présente, comme pour la formulation (A), aucun pouvoir discriminant sur des bassins dont on sait qu'ils sont à différencier (Cf. Tableau 7).

Des analyses d'écotoxicité ont permis de vérifier jusqu'à quelle profondeur le compartiment sol est toxique pour l'environnement ; nous avons réalisé ces analyses avec le ray grass, avec des tests de germination et avec des vers de terre (tests d'évitement et de mortalité), toutefois pour les organismes testés le sol n'est se pas montré toxique.

La dernière proposition – D, plus simple, utilise une seule valeur limite, avec prise en compte des incertitudes des mesures de sols. Elle utilise comme seuil les valeurs de définition source sol de la normalisation française, et l' IS_{SOL2} utilise le pourcentage de cas où au moins un polluant dépasse les valeurs seuils.

$$K_1 = \frac{\#cas[C_{mesi} \leq VDSS_i]}{\#_{totpol}}. \quad (\text{Équation 4.7})$$

$\#cas$: nombre de polluants pour lesquels le cas entre [] se présente

$\#_{totpol}$: nombre total de polluants

C_{mesi} : concentration du polluant i mesuré dans le sol

$VDSS_i$: valeur de définition de source-sol du polluant i

Les deux indicateurs sont : IS_{SOL1}^D qui représente la profondeur à laquelle le sol atteint une pollution faible et IS_{SOL2}^D le pourcentage de points échantillonnés présentant une pollution importante ($K_2 > 0$). Cette dernière formulation a été appliquée au quatre bassins tests. Elle résout les problèmes des propositions antérieures et a été validé (Cf. Tableau 7).

Sens de préférence : Plus IS_{SOL1}^C et IS_{SOL2}^C sont faibles, meilleure est la performance.

Tableau 7 - Résultats des indicateurs ISSOL1 et ISSOL2 pour les différentes formulations (A, B et C)

	Droits de l'Homme	Centre Routier	ZAC du Chêne	ZAC de Pivolles
IS_{SOL1}^A	> 90 cm	> 90 cm	> 90 cm	> 90 cm
IS_{SOL2}^A	3,6	2,3	3,8	2,3
IS_{SOL1}^B	40-45 cm	30-40 cm	30-35 cm	> 90 cm
IS_{SOL2}^B	33%	30%	44%	22%
IS_{SOL1}^C	>90 cm	>90 cm	>90 cm	>90 cm
IS_{SOL2}^C	22%	33%	33%	22%
IS_{SOL1}^D	35-40 cm	30-40 cm	30-35 cm	>90 cm
IS_{SOL2}^D	100%	70%	66%	33%

4.4 Préserver les ressources naturelles

Idem considérations § 3.4

4.5 Etre maintenable techniquement et facilement par l'organisation

Cette performance a pour but d'estimer la facilité d'entretien d'un système d'infiltration. Une première approche basée sur les matériels utilisés et la facilité d'entretien des ouvrages, utilisant des règles expertes, a donné des résultats peu robustes, en effet chaque acteur a évalué d'une façon différente un même ouvrage.

Nous avons donc proposé un indicateur basé sur les fiches d'entretien dont un exemple est présenté ci-dessous, pour chaque type de système d'infiltration. L'objectif de ces fiches est de permettre d'évaluer si les tâches et la fréquence d'entretien sont respectées. Si ce n'est pas le cas, le manque d'entretien doit être explicité, ce qui doit permettre au gestionnaire d'identifier les problèmes survenus lors de l'entretien et ainsi faciliter la résolution du problème. Ces fiches restent à être validées ainsi que le système de notation qui sera mis en place.

$$IS_{MAINT} = note$$

note : comprise entre 0 et 1

Sens de préférence : Plus IS_{MAINT} est proche de 1, meilleure est la performance.

Tableau 8 – Exemple de fiche d'entretien d'un bassin (à valider)

Tâche	Fait	Si non motif	Fréquence
Curage	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Pas d'accès <input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Autre motif : _____	1 fois /an
Nettoyage des ouvrages de prétraitement : Désableurs Régulateurs de débit Séparateurs à hydrocarbures	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Pas d'accès <input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Autre motif : _____	1 fois /an
Entretien des espaces verts (si pertinente)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Pas d'accès <input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Autre motif : _____	1 fois /mois
Grattage de la surface (si pertinente)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Pas d'accès <input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Autre motif : _____	1 fois /an
Désherbage du fond et des berges (si pertinente) et avec quel produit ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	<input type="checkbox"/> Pas d'accès <input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> Manque du matériel nécessaire <input type="checkbox"/> Autre motif : _____	1 fois /an

Actuellement les fiches d'entretien sont en validation.

4.6 Garantir la santé et la sécurité des usagers/personnels

Objectifs et considérations générales

La santé et sécurité des personnes liées aux ouvrages d'infiltration sont très souvent négligées, cependant nous devons nous poser la question des risques d'accidents et des risques sanitaires liés à ces systèmes. Les risques d'accidents sont principalement liés à la structure des systèmes et les risques sanitaires sont dus à la pollution du sol de surface, qui peut être entraînée par l'air, et les risques de contact des personnes avec le sol contaminé.

Il faut considérer que l'environnement est un des déterminants de la santé publique, l'air est un compartiment de l'environnement mais aussi un vecteur d'exposition des populations pour de nombreuses sources, naturelles ou anthropiques, de pollution.

Point de vue adopté

La performance du système est d'autant meilleure que le système ne présente pas de danger :

- sur le plan sanitaire (pouvant venir de la pollution de l'air ou du sol que ce soit pour le personnel ou les usagers) ;
- sur le plan structurel.

Sur le plan sanitaire, trois types d'expositions aux polluants ont été identifiés. Le contact direct avec sol contaminé par les usagers du système, cela se produit quand le système est ouvert au public. Le contact avec l'air pollué par les usagers des systèmes, quand le système est ouvert au public, ou le contact avec l'air pollué par les riverains des systèmes. Le troisième type d'exposition concerne le

personnel qui travaille dans l'entretien des systèmes, pour eux le contact est à la fois avec le sol et l'air.

Sur le plan structurel l'ouvrage peut présenter des risques au personnel d'entretien.

Définitions des indicateurs

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié au sol pour les usagers

Il est basé sur la concentration moyenne en polluant mesurée 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 dont la concentration est inférieure aux valeurs seuils VCI_{US} et l'autre représente le pourcentage de polluants dont la concentration est supérieure aux valeurs seuils VCI_{UNS} .

$$K_3 = \% \text{ cas } [C_{mesi} \leq VCI_{USi}] \text{ et} \quad (\text{Équation 4.8})$$

$$K_4 = \% \text{ cas } [C_{mesi} \geq VCI_{UNSi}] \quad (\text{Équation 4.9})$$

$$\text{Si } K_3 = 100\% \Rightarrow IS_{SAN1} = 1$$

$$\text{Si } K_3 < 100\% \Rightarrow IS_{SAN1} = K_3 \text{ mais, Si } K_4 > 0\% \Rightarrow IS_{SAN1} = 0$$

Sens de préférence : Plus IS_{SAN1} est proche de 1, meilleure est la performance.

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air pour les usagers et riverains

Pour l'aspect sanitaire lié à l'air, nous proposons un indicateur basé sur le pourcentage K_5 de cas où

$$K_5 = \% \text{ cas } \left[\frac{C_{mesi}}{C_{limi}} > \alpha \right] \quad (\text{Équation 4.10})$$

$$\text{Si } \left[\frac{C_{mesi}}{C_{limi}} > 1 \right] \text{ alors } IS_{SAN2} = 0$$

$$\text{Si } K_5 > 50\%, \text{ alors } IS_{SAN2} = 0,5$$

$$\text{Si } K_5 \leq 50\%, \text{ alors } IS_{SAN2} = 1$$

Sens de préférence : Plus IS_{SAN2} est proche de 1, meilleure est la performance.

Indicateur concernant l'aspect sanitaire lié à l'air et aux particules pour les personnels

Pour le personnel la même formulation que pour IS_{SAN2} est utilisée, 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).

C_{mesi} : Concentration mesurée du polluant i ,

VCI_{USi} : Valeur constat d'impact usage sensible pour le polluant i (BGRM, 2000),

C_{limi} : concentration limite du polluant i ,

α : valeur seuil,

C_{limi} est fixée par l'OMS (OMS, 2000).

Indicateur concernant l'aspect structurel de l'ouvrage

En ce qui concerne la sécurité des personnels pour la phase de suivi il est important d'évaluer les risques pendant les travaux d'entretien. Les risques sanitaires sont pris en compte dans l'aspect

santé, par contre les risques d'accidents devront être évalués par un autre indicateur. L'indicateur proposé est basé sur l'opinion des intervenants.

Un indicateur binaire est proposé : L'ouvrage pose-t-il des problèmes de sécurité aux intervenants ? Si oui, quel type de risque ?

L'évaluation de cette indicateur doit prendre en compte les motifs de risque et un examen doit être fait afin d'évaluer si ce risque existe effectivement.

Actuellement de tests avec les indicateurs relatifs à l'aspect sanitaire doivent être faits car les problèmes de pollution générés par les systèmes d'infiltration, surtout liées à la pollution de l'air, peuvent être négligeables par rapport à la pollution urbaine ou industrielle.

L'indicateur concernant l'aspect structurel est en cours de validation.

4.7 Produire des déchets facilement gérables

Le curage fréquent des systèmes d'infiltration doit être fait pour minimiser les risques de contamination et maximiser leur efficacité opérationnelle (Clozel et al., 2006). La définition de la fréquence de curage des sédiments exige une bonne compréhension des quantités et qualités de ces dépôts (Yousef et al, 1994). Ces types de connaissances sont encore peu stabilisés, nous attendons les résultats des travaux de la tâche B1 et B2.

4.8 Avoir un coût peu élevé

Objectif :

Pour le suivi, la performance « économique » est d'autant meilleure que les coûts de maintenance et de réparation sont peu élevés et n'évoluent trop pas au long du temps.

Définition de l'indicateur

$$IS_{COUT} = VAN(C_m)/an \quad (\text{Équation 4.11})$$

Sens de préférence : Plus IS_{cout} est faible, meilleure est la performance.

$VAN(C_m)$: Valeur actuelle nette des coûts de maintenance et de réparation depuis l'implantation du système jusqu'au moment de l'observation

an : le nombre d'années de fonctionnement

4.9 Acceptabilité sociale d'un scénario

Objectifs :

Cette performance consiste à mesurer si un aménagement ou un ouvrage est bien accepté par les usagers ou les riverains.

Point de vue adopté

En ce qui concerne l'acceptabilité sociale d'un ouvrage pendant sa durée de vie, la proposition est d'utiliser comme indicateur l'existence de plaintes de riverains en relation à l'ouvrage en question.

Définition de l'indicateur

Pour la phase de suivi l'important est savoir si l'ouvrage présente des gênes.

$IS_{AS} = 0$ si il y a des plaintes des riverains du bassin considéré

$IS_{AS} = 1$ si il n'y a pas de plaintes des riverains de l'ouvrage

Sens de préférence : une valeur de IS_{AS} égale à 1 indique une meilleure performance que si elle est de 0

Une vérification de l'état du bassin doit être faite en parallèle avec l'analyse des plaintes. Cette vérification vise à identifier les dysfonctionnements des systèmes d'infiltration qui pourraient causer de gênes aux riverains. L'analyse consiste en la vérification d'une liste de dysfonctionnements possibles pour chaque type de technique d'infiltration. Le Tableau 9 présente un exemple de liste de dysfonctionnements possibles pour un bassin.

Tableau 9 - Liste des dysfonctionnements possibles par type de technique

Bassins	
Aspect négligé (du bassin lui-même et des autres dispositifs) : présence de déchets, de déversement, mauvais entretien	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence d'érosion	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Revêtement en mauvais état	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence importante d'insectes	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Présence de poches d'eau stagnante	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
Autres :	Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>

Actuellement l'hypothèse de qu'un système est mieux accepté s'il est bien entretenu est à confirmer à partir du avis de chercheurs qui travaillent avec l'acceptabilité sociale des techniques alternatives en général et des fiches de suivi.

5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette action a permis d'avancer significativement sur l'élaboration d'indicateurs de performances des systèmes de drainage par infiltration. Elle permet de disposer d'outils d'évaluation pour des phases de conception et de suivi qui sont validés conjointement par des opérationnels et des scientifiques.

L'apport de la pluri-disciplinarité et de la diversité des points de vue est très précieux. Il permet d'une part de s'assurer que les indicateurs définis sont compatibles avec les informations dont disposent les gestionnaires et qu'ils sont parfaitement utilisables et compréhensibles. La pluridisciplinarité a permis en outre d'avancer sur la définition d'indicateurs particuliers qui présentaient des défauts récurrents. C'est le cas par exemple de l'indicateur "*Permettre un bon état de la nappe*" défini grâce aux observations en continu de la qualité des eaux souterraines en aval des dispositifs d'infiltration faite par les hydrobiologistes de Lyon I.

Ce type de travail présente en outre l'avantage de formuler les connaissances et permet particulièrement bien d'identifier les lacunes et d'orienter les recherches futures.

Enfin, il a permis de constituer et de pérenniser un partenariat entre scientifiques et opérationnels sur le problème de la gestion des eaux pluviales qui attirent désormais d'autres acteurs.

Comme perspectives pour aboutir aux objectives de la tâche, plusieurs points devront être pris en compte :

- Continuation de la réflexion sur la construction des indicateurs intégrant l'analyse systématique de qualité des indicateurs proposés. Dans cette partie, qui constituera une part importante du travail, il s'agira d'arrêter la définition des indicateurs. Pour cela, des études de comparaison entre plusieurs formulations seront nécessaires lorsque diverses définitions sont proposées.
- Des données sont encore en cours d'acquisition concernant la gestion des déchets par exemple, d'autres doivent être acquises comme celles relatives à la pollution de l'air. Il s'agira donc d'en terminer l'acquisition.
- La qualité et la validité des indicateurs devront ensuite être examinées en les appliquant à des opérations concrètes existantes. La méthode existe, il faudra simplement la mener avec rigueur. L'évaluation systématique des incertitudes doit dans ce cadre être conduite.

- Une réflexion sérieuse doit enfin être menée sur la redondance possible ou sur l'interdépendance de certains indicateurs comme par exemple l'aptitude à retenir la pollution dans l'ouvrage, à ne pas polluer le sol en profondeur et à produire des déchets facilement gérables.

La suite devra être aussi consacrée au développement de méthodologies multicritères d'aide à la décision.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient outre le programme PRECODD de l'ANR et les partenaires du projet ECOPLUIES, l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine) pour le soutien scientifique et la Région Rhône Alpes pour le soutien financier apporté dans la thèse de Priscilla Moura Macedo.

7 REFERENCES

- Azzout Y. (1996). *Aide à la décision appliquée au choix des techniques alternatives en assainissement pluvial*. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1996, 245 p.
- Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F.-N., Alfakih E. (1994). *Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien*. Paris: Lavoisier, 1994. 372 p.
- Barbosa A.E. (2000). *Highway runoff pollution and design of infiltration ponds for pollutant retention in semi arid climates*, Thèse de l'Université de Aalborg, Danemark. 2000. 52 p.
- Barraud S. (coordonnateur), Le Coustumer S., Perrodin Y., Delolme C., Winiarski T., Bedell J.-P., Gibert J., Malard F., Mermillod Blondin F., Gourdon R., Desjardins V., Brelot E., Bacot L. (2006). *Guide Technique : Recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain*. Document rédigé dans le cadre du Programme « MGD Infiltration » (Maîtrise et gestion durable des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain) financé par le Réseau Génie Civil & Urbain. 62 p.
- Barraud S., Bardin J.-P., Alfakih E., Abdelmalki L. (2001). *Construction d'indicateurs de performances techniques, économiques, et environnementales des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain*. Compte rendu final de l'action de recherche initiée dans le cadre de L'Action Concertée Incitative Ville. Lyon : 2001, 129 p.
- Barraud S., Miramond M., Alfakih E. (2004). 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] ed. by A. Antunes (University of Coimbra & Decision Making in Urban and Civil Engineering society).
- BRGM (2000). *Gestion des sites (potentiellement) pollués*. Version 2, 2000.
- Chocat B., Bertrand-Krajewski J.-L., Barraud S., *Les eaux pluviales urbaines et les rejets urbains de temps de pluie*. Les techniques de l'Ingénieur. (*in press*).
- Citeau L. (2006). *Transfert sols-eaux-plantes de micropolluants: état des connaissances et application aux eaux de ruissellement urbaines*. Rapport Final. 2006. 131 p.
- Clozel B ; Ruban V ; Durand C ; Conil P. (2006). Origin and mobility of heavy metals in contaminated sediments from retention and infiltration ponds. *Applied geochemistry*. 21 (10), 1781-1798.
- Datry, T. (2003). *Urbanisation et qualité des nappes phréatiques. Réponses des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau pluviale*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, 220 p.
- Dechesne M. (2002) *Connaissance et modélisation du fonctionnement des bassins d'infiltration d'eaux de ruissellement urbain pour l'évaluation des performances techniques et environnementales*

sur le long terme. Thèse de doctorat Génie Civil. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002, 276 p. + annexes.

- Gilard, O. (1998). *Les bases techniques de la méthode Inondabilité*. 1998. Cemagref Editions. 207p.
- Hauger M.B., J.-M. Mouchel, Mikkelsen P.S. (2006). Indicators of hazard, vulnerability and risk in urban drainage. *Water Science & Technology*. 54 (6-7), 441–450.
- HR WALLINFORD (2005). *An Assessment of the Social Impacts of SUDS in the UK*, Ciria, 2005. disponible en < http://www.ciria.org/suds/pdf/social_impact_summary.pdf >.
- IFEN (2000). Aménagement du territoire et environnement : politiques et indicateurs, Publication : Institut Français de l'Environnement, 2000 , 132 p.
- INRS Institut national de recherche et de sécurité pour la prévision des accidents du travail et des maladies professionnelles (2004). Les hydrocarbures Aromatiques ED 4226. 2004. *disponible en ligne* <www.inrs.fr>.
- Labouze E. & R. (1995). La comptabilité de l'environnement. *Revue Française de Comptabilité*, 1995, n°272, 92 p.
- MEE Ministry of Environment and Energy of Ontario(1994). Stormwater management practices planning and design manual. 1994 260p.+annexes.
- NMHSPE (2000). *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/>>.
- OFEFP - Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (2002). *Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication*. Publications OFEFP. Berne, 57 p.
- OMS (2000). Air quality guidelines for Europe. 2nd edition. WHO Regional Publications, European series, n° 91.
- Penning-Rowsell E, Floyd P, Ramsbottom D, Surendran S. (2005). Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework. *Natural Hazards* 36 (1-2): 43-64.
- Perrodin Y., Delolme C., Winiarski T., Bedell J.-P., Barraud S., Bardin J.-P., Le Coustumer S., Gibert J., Malard F., Mermillot-Blondin F., Gourdon R., Desjardin V., BreLOT E., Bacot L. (2005). *Rapport final du Programme "MGD Infiltration" (maîtrise et gestion durable des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain)*, Programme RGPU financé par le Ministère de la Recherche, novembre 2005, 250 p.
- Pomerol, J.C., Barba-Romero, S. *Choix multicritère dans l'entreprise*. Ed. Hermès, Collection « Informatique », Paris, 1993, 390 p.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology* 15(3): 234-281.
- UPRCT. Upper Parramatta River Catchment Trust (2004). Water Sensitive Urban Design: Technical guidelines for western Sydney.
- Yousef Y.A, Hvitved-Jacobsen T., Sloat J., Lindeman W. (1994), Sediment accumulation in detention or retention ponds, *Sci. Total Environ.* 451–456.