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

Délivrables D-A2 & D-A3

Calage de modèles optimisés de fonctionnement hydrologique

diachronique des bassins d'infiltration et analyse de l'évolution du

colmatage

Etape 1 : Etude de l'évolution du comportement hydraulique d'un ouvrage d'infiltration en service

Etape 2 : Calage et validation du modèle

Responsables du rendu :

Barraud S., Le Coustumer S., INSA LGCIE

Juin 2008





Sommaire

1	INTRODUCTION ET OBJECTIFS	5
2	METHODES	7
		7
	2.1 T RESENTATION DO SITE ET DE L'INSTROMENTATION	····· 7
	2.1.7 Outrage et christmentent	í
	2.2 METHODE D'ESTIMATION DES APPORTS	10
	2.2.1 Méthode d'identification des périodes de temps de pluie et de temps sec	11
	2.2.2 Exemple d'identification des périodes de temps sec et de temps de pluie	11
	2.2.3 Méthode d'évaluation des concentrations en MES et DCO - Relation MES - turbidité	et
	DCO-turbidité	13
	2.2.4 Evaluation des incertitudes	15
	2.2.5 Incertitudes sur une série chronologique d'évènements	18
	2.2.6 Incertitudes sur les concentrations	19
	2.2.7 Exemple de reconstitution des masses et des calculs d'incertitudes	19
	2.2.8 Estimation de l'épaisseur de sédiments dans l'ouvrages	20
	2.3 EVALUATION DE LA CAPACITE D'INFILTRATION DE L'OUVRAGE	21
	2.3.1 Caracterisation du colmatage	21
	2.3.2 Incertitudes sur la resistance hydraulique	23
3	RESULTATS	26
	3.1 RECONSTITUTION DES SOLLICITATIONS	26
	3.1.1 Reconstitution des volumes et des masses totales	26
	3.1.2 Epaisseur de sédiments dans l'ouvrage	28
	3.2 EVOLUTION HYDRAULIQUE	29
	3.2.1 Calage d'un modèle d'infiltration	29
	3.2.2 Etude des hauteurs d'eau en fonction du temps	34
	3.2.3 Influence des apports sur le fonctionnement de l'ouvrage	37
4	DISCUSSION	39
•		
	4.1 QUALITE DES EAUX DE RUISSELLEMENT	39
	4.2 EVALUATION DES MASSES DE SEDIMENTS DANS L'OUVRAGE	39 20
	4.3 EVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE AVEC LE TEMPS	39 10
	4.4 OURRELATION ENTRE COLIVIATAGE ET QUALITE DES APPORTS	40
5	CONCLUSIONS	41
R	EFERENCES	43





1 Introduction et objectifs

La zone superficielle des bassins d'infiltration subit au cours de son vieillissement de nombreux processus, comme des apports discontinus d'eaux, de sédiments et de polluants. Ces apports intermittents liés aux pluies se traduisent par divers phénomènes physico-chimiques (filtration, adsorption...) et biologiques (développement microbien...) rendant l'interface de l'ouvrage très évolutive dans le temps et très hétérogène dans l'espace.

Dans ce contexte, le programme Ecopluies propose d'étudier « *l'évolution de l'interface, de sa fonction de filtre et des phénomènes de colmatage qui peuvent s'y développer* » (Tâche A2).

Le premier objectif de la tâche est de continuer à caractériser physiquement, chimiquement et biologiquement l'évolution de cette interface. Le deuxième objectif, dont traite plus particulièrement ces délivrables, est de quantifier l'évolution du colmatage en relation avec les apports au bassin.

Le risque de colmatage des systèmes par infiltration est en effet un problème de première importance. Des études de terrain l'ont montré à plusieurs reprises. Lindsey *et al.* (1992), ont mis en évidence que seulement 38% des ouvrages d'infiltration fonctionnaient conformément à leur dimensionnement et 31 % étaient colmatés après seulement quatre années de service. De même, Schueler *et al.* (1992), in Barrett *et al.* (2004) ont montré que 50% des systèmes d'infiltration présentaient des dysfonctionnements liés au colmatage.

Ce colmatage entraîne une réduction de la conductivité hydraulique et a pour conséquences majeures :

- un risque d'inondation en cas d'événements pluvieux importants ;
- une stagnation possible de l'eau dans le système ;
- des problèmes esthétiques entraînant une mauvaise intégration des systèmes dans l'environnement urbain.

Dans ce contexte, l'étude du comportement d'un ouvrage d'infiltration en service et en continu sur une longue période s'avère nécessaire. Cette mesure en continu et sur une longue période doit permettre :

- d'évaluer s'il y a des modifications dans le comportement hydraulique de l'ouvrage au cours du temps, c'est-à-dire d'estimer la rapidité avec laquelle le colmatage se produit,
- de développer et/ou caler des modèles susceptibles de reproduire le phénomène ou le fonctionnement d'un ouvrage colmaté.
- de mettre, à terme, en relation ces possibles variations de fonctionnement avec les sollicitations auxquelles il est soumis. Cela nécessite cependant de mesurer de manière concomitante les sollicitations susceptibles de produire le colmatage (MES apportées en temps sec et en temps de pluie, matière organique, ...);

Nous présentons dans un seul délivrable l'ensemble des travaux concernant l'étude du colmatage de manière à rendre l'information plus cohérente et plus accessible. Il couvre donc :

- le délivrable DA2 Calage de modèles optimisés de fonctionnement hydrologique diachronique des bassins d'infiltration et analyse de l'évolution du colmatage (Etape 1 : Etude de l'évolution du comportement hydraulique d'un ouvrage d'infiltration en service) déjà fourni en juillet 2007.
- le délivrable DA3 Calage de modèles optimisés de fonctionnement hydrologique diachronique des bassins d'infiltration et analyse de l'évolution du colmatage (Etape 2 : Calage et validation du modèle)

Pour mener à bien cette recherche, nous nous appuyons sur les observations faites sur un bassin en service du Grand Lyon instrumenté de manière fine dans le cadre de l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine).

Ces travaux font l'objet d'une partie de la thèse de doctorat (Le Coustumer, 2008)

2 Méthodes

2.1 Présentation du site et de l'instrumentation

2.1.1 Ouvrage et environnement

L'ouvrage sélectionné est situé dans la banlieue Est de Lyon sur la commune de Chassieu (69, France) et porte le nom de "Django Reinhardt". Il draine un bassin versant de type industriel, d'une surface de 185 ha, plutôt plat (pente moyenne de 4‰ dans le sens Est-Ouest) et de coefficient d'imperméabilisation d'environ 75%.

Le bassin versant est drainé par un réseau séparatif pluvial. Ce réseau reçoit en outre et en permanence des eaux de temps sec « théoriquement » propres venant de process industriels de la zone (eaux de refroidissement par exemple). Ce réseau aboutit à un système composé d'un bassin de rétention/décantation suivi d'un bassin d'infiltration (Figure 1a et b). Les volumes de ces deux compartiments sont respectivement de 32 000 m³ et 61 000 m³. Ce sont de grands ouvrages situés à l'exutoire de réseau et donc de conception ancienne (à opposer aux ouvrages de gestion à la source étudiés au chapitre précédent).

L'ouvrage d'infiltration à une surface de fond d'environ 8 000 m² relativement plane comme le montre le plan topographique du fond de l'ouvrage (Figure 1 d). La différence d'altitude entre le point haut de l'ouvrage situé au niveau de l'arrivée d'eau (point 1 sur la Figure 1 c) et le point bas de l'ouvrage est de 60 cm (point 4 de la Figure 1 c). Le rapport entre la taille de l'ouvrage d'infiltration et la surface imperméabilisée du bassin versant est d'environ 0.6 %.



Figure 1 : Vue aérienne des ouvrages d'infiltration et de décantation (a), schéma du système de décantation et d'infiltration (b), vue en 3 dimensions de l'ouvrage d'infiltration avec emplacement des capteurs de hauteur (c), plan topographique du fond de l'ouvrage (d)

La nappe phréatique est profonde dans cette zone (13 m sous le fond du bassin). L'ouvrage est situé sur une couche de sol fluvio-glaciaire qui a une conductivité hydraulique moyenne de 5.10^{-4} m/s (1800 mm/h) (Barraud *et al.* 2002). L'analyse granulométrique a montré que cette couche fluvio-glaciaire est composée majoritairement de matériaux grossiers : 30% de graves (diamètre > 20 mm), 45 % de gravier (20 mm > d > 2 mm), 20% de sable grossier (2 mm > d > 0.2 mm) et 5% de sable fin (0.20 mm > d >0.08 mm) (Figure 2).



Figure 2 : Courbe granulométrique du sol de Chassieu

2.1.2 Instrumentation

Les deux bassins qui constituent le système sont instrumentés dans le cadre de l'OTHU. Nous ne présenterons ici que la part de l'instrumentation en relation avec l'étude du comportement du bassin d'infiltration. Le dispositif expérimental complet peut être consulté à la référence (Barraud et *al.*, 2002). L'instrumentation mise en place permet de connaître en continu avec un pas de temps de 2 minutes différentes grandeurs. Les mesures ont commencé en décembre 2003.

Le débit entrant dans le bassin d'infiltration est déduit des mesures de hauteurs d'eau effectuées avec deux sondes piézorésistives et des mesures de vitesses effectuées avec deux sondes Doppler. Ces mesures sont en effet doublées afin de réduire les incertitudes.

La hauteur d'eau dans l'ouvrage est mesurée par quatre capteurs piézorésistifs (positionnement indiqué à la Figure 1 c). Ces capteurs de hauteur ont pour but de reconstituer les surfaces d'infiltration et les volumes d'eau dans l'ouvrage. Le capteur 1 se situe au niveau de l'entrée d'eau, les capteurs 2 (installé en avril 2005) et 3 (installé en août 2005) se trouvent au milieu de l'ouvrage et le capteur 4 (installé en septembre 2005) est le plus éloigné de l'entrée et est localisé au point bas (Cf. Figure 1 c).

La **qualité des eaux** entrant dans le bassin d'infiltration est évaluée en continu par des mesures de la turbidité, du pH, de la conductivité et de la température. La mesure de turbidité est corrélée à la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et aux Matières En Suspension (MES), qui on le sait, constitue le principal vecteur de la pollution fixée à ces matières. Cette mesure est doublée et est effectuée d'une part par un turbidimètre à transmission et d'autre part par un turbidimètre nephélométrique. Pour réaliser ces acquisitions en continu, l'eau est pompée dans la conduite d'arrivée (à l'entrée du bassin d'infiltration) et passe dans un canal où sont installés les différents

capteurs (voir Figure 3). Des mesures ponctuelles sont aussi possibles lors d'un événement pluvieux ou d'une période de temps sec grâce à un préleveur automatique réfrigéré. Il est alors possible de faire des mesures de concentrations notamment de métaux lourds (Cd, Zn, Pb, Cu...), d'hydrocarbures totaux, d'HAP, de MES, de pollution organique globale (DCO, Carbone Organique Total (COT)) et de nutriments (N, P principalement).





Figure 3 : Chaîne de mesures installée en entrée du bassin d'infiltration

2.2 Méthode d'estimation des apports

Les apports (volume et qualité des eaux entrant dans l'ouvrage) sont importants à estimer car ils conditionnent le fonctionnement des systèmes techniques et notamment des bassins d'infiltration. Il est donc nécessaire de définir une méthode permettant d'évaluer les quantités d'eau et de matières qui sont en jeu. En terme de matières, nous nous intéresserons plus particulièrement aux solides (MES) car elles constituent le vecteur principal des polluants majeurs des eaux de ruissellement pluvial mais également parce que les MES sont supposés jouer un rôle important dans le colmatage physique des ouvrages d'infiltration. Nous nous intéresserons également à la DCO car c'est un paramètre traduisant globalement la charge organique des apports. Elle est également susceptible de jouer un rôle non négligeable dans le colmatage tant physique que biologique. Enfin ils sont choisis car il est possible d'obtenir indirectement une bonne couverture de ces paramètres extrêmement variables dans le temps par la mesure en continu de la turbidité (Fletcher et Deletic, 2007).

Nous caractériserons les apports par :

- les débits et volumes par pas de temps de 2 min, à l'aide des mesures en continu,
- les débits et volumes par événement de temps de pluie et par période de temps sec,
- les volumes totaux sur des chroniques longues (plusieurs années par exemple),
- les concentrations en MES et en DCO par pas de temps de 2 min,
- les masses de MES et de DCO par événement de temps de pluie et par période de temps sec,
- les masses totales cumulées sur des chroniques longues (plusieurs années),

- les incertitudes sur ces grandeurs.

Ce travail demande que soient définis :

- une méthode permettant d'identifier le temps sec et le temps de pluie dont les caractéristiques en terme de qualité sont différentes,
- un moyen de reconstituer les concentrations en MES et DCO au cours du temps à partir des mesures disponibles,
- une démarche de calculs des incertitudes.

2.2.1 Méthode d'identification des périodes de temps de pluie et de temps sec

Afin d'estimer les volumes de pluie et de temps sec, ainsi que la quantité des polluants apportés à l'ouvrage il faut tout d'abord différencier les périodes de temps sec et de temps de pluie.

Les données sont d'abord analysées à chaque pas de temps de 2 min. On s'assure qu'il y a des données de débit, puis de turbidité pour le pas de temps considéré. Puis, si le débit est supérieur à 2 l/s (valeur basée sur l'analyse des hydrogrammes en entrée d'ouvrage), le pas de temps est affecté au temps de pluie. Les événements sont ensuite regroupés et on vérifie alors :

- que le volume de l'événement est supérieur à 500 m³;
- qu'il y a bien eu une pluie provoquant la montée de débit entre les 6h qui ont précédé cette montée, c'est-à-dire qu'il y a eu sur cet intervalle de temps au moins un basculement d'auget au pluviomètre le plus proche (Bron).

Ce second tri permet de ne pas considérer comme événements de temps de pluie, des rejets de type industriel douteux qui peuvent représenter de forts débits mais qui ne correspondent pas à une pluie. Comme nous le montrerons par la suite, ces rejets se font de manière régulière et peuvent représenter des débits et des volumes importants. Ainsi s'ajoute au débit de temps sec habituel (infiltration de l'eau du sol dans le réseau) un débit dû à l'activité des entreprises du site.

Les mesures se faisant avec un pas de temps de 2 min et sur une durée de 3.5 ans, ce découpage a été automatisé. Le fonctionnement du programme qui fait ce découpage est présenté en annexe D. D'autres méthodes plus sophistiquées ont été testés et fournissent des résultats très similaires (Torres *et al.*, 2007).

2.2.2 Exemple d'identification des périodes de temps sec et de temps de pluie

Afin d'illustrer la méthode pour analyser les données, une période d'une durée de 15 jours, (entre le 13 juin et le 25 juin 2005) a été sélectionnée. Cet exemple va permettre d'expliquer la méthode de découpage entre temps sec et de temps de pluie et de montrer l'influence des rejets industriels.

La Figure 4 présente d'une part le débit entrant dans l'ouvrage (mesuré avec un pas de temps de 2 min) et d'autre part l'intensité des événements pluvieux sur la même période mesurée au pluviomètre de Bron situé a proximité de l'ouvrage. La Figure 5 présente quant à elle, le débit entrant et la turbidité à chaque pas de temps. Ces deux figures représentent les données mesurées à l'entrée du bassin d'infiltration.



Figure 4 : Hyétogramme (mm/h, en haut) et hydrogramme à l'entrée de l'ouvrage d'infiltration (l/s, en bas) entre le 13/06/05 et le 18/06/05



Figure 5 : Hydrogramme à l'entrée de l'ouvrage d'infiltration (I/s) et turbidité (NTU) entre le 13/06/05 et le 18/06/05

Les caractéristiques des quatre événements pluvieux mesurés par le pluviomètre sont présentées dans le Tableau 1. Sur cette période, seuls les événements entre le 13 et le 14 juin

(événement 1 à 4) sont susceptibles de provoquer du ruissellement. L'événement pluvieux du 25 juin ne produit pas de ruissellement car la hauteur précipitée est inférieure à 1 mm.

# événement	Heure de début	Heure de fin	Durée (min)	Hauteur (mm)	I moyenne (mm/h)	DTS (h)
1	13/06/05 14:59	13/06/05 15:45	47	1.8	2.3	233.11
2	13/06/05 20:43	14/06/05 3:48	426	13.2	1.86	4.98
3	14/06/05 9:51	14/06/05 10:47	57	4.2	4.42	6.06
4	14/06/05 15:53	14/06/05 17:32	100	15.2	9.12	5.11
5	25/06/05 16:14	25/06/05 16:21	8	0.4	3	262.71

Tableau 1: Caractéristiques des événements pluvieux entre le 13/06/2005 et le 28/06/05

Sur la Figure 4 on remarque une augmentation très importante du débit à l'entrée de l'ouvrage entre le 13 et le 16 juin (délimité par une flèche), qui correspond aux événements pluvieux #1 à #4. On remarque aussi des pics réguliers de débit en l'absence de pluie, caractéristiques des rejets industriels dans le réseau pluvial. Lorsque l'on fait le découpage sec/pluie, il est important de prendre en compte ces rejets de temps sec.

2.2.3 Méthode d'évaluation des concentrations en MES et DCO - Relation MES - turbidité et DCO-turbidité

La reconstitution des concentrations en MES et en DCO apportées à l'ouvrage va permettre d'évaluer les masses de sédiments qui arrivent à l'ouvrage et les masses de matière organique de ces apports. La méthode pour reconstituer les concentrations en MES et en DCO à partir des mesures de turbidités est décrite de façon précise dans Bertrand-Krajewski *et al.* (2007). Une attention particulière a été donnée à l'obtention de ces relations. En effet, elles vont conditionner en grande partie l'estimation des masses totales de polluants (MES et DCO) apportés à l'ouvrage. L'évaluation des incertitudes sur ces relations est donc de première importance.

L'obtention de ces relations se fait par prélèvement d'échantillons pendant des périodes de pluie et de temps sec qui sont ensuite analysés conjointement en MES et turbidités ou en DCO et turbidité.

Pour connaître conjointement les MES et la turbidité d'un effluent, il est nécessaire de travailler sur des prélèvements communs où les deux mesures sont maîtrisées. Pour cela, à l'aide du dispositif de prélèvement existant sur Django Reinhardt (Cf. Figure 3), plusieurs prélèvements sont effectués par temps sec et par temps de pluie pour différentes pluies. Chaque prélèvement est de 1L. Cette quantité prélevée est ensuite placée dans un bêcher et agitée pendant quelques minutes. Les capteurs de turbidité utilisés sur le site, préalablement étalonnés, sont placés au contact de l'effluent. 50 mesures de turbidité sont alors effectuées. Le contenu du bêcher est ensuite séparé en trois parties égales dont le contenu est analysé en MES (mesure tripliquée). Les mesures de MES sont réalisées selon la norme AFNOR NF EN 872. A l'aide d'un équipement de filtration sous vide, l'échantillon est filtré sur un filtre en fibres de verre. Le filtre est ensuite séché et la masse du résidu

retenu sur le filtre est déterminée par pesée (différence entre les poids du filtre sec et couvert de résidu). La valeur de la concentration en MES est déduite de cette masse et du volume connu de solution filtrée. Chaque mesure ainsi obtenue (turbidité et MES) est quantifiée par une valeur moyenne issue respectivement de 50 mesures pour la turbidité et de 3 pour les MES. Les incertitudes sur ces mesures peuvent donc être évaluées à partir de la dispersion des analyses (erreur sur l'échantillon) et des incertitudes sur la mesure du capteur (erreur liée à l'étalonnage) comme nous le verrons ultérieurement. La même procédure est utilisée pour la concentration en DCO en fonction de la turbidité. Les données sont ensuite analysées statistiquement à chaque étape du processus :

- analyse des triplicats et élimination des valeurs trop éloignées des valeurs moyennes,
- élimination des valeurs ayant une incertitude supérieure à 25 % de la valeur mesurée,
- analyse de l'ensemble des données et élimination des valeurs hors de l'intervalle de confiance à 95%.

Cela aboutit à des séries de couples (concentrations en MES, turbidités) et (concentrations en DCO, turbidités). La méthode permettant d'approximer la relation MES / turbidité et DCO/ turbidité est alors mise en oeuvre. Une régression linéaire peut être proposée au vu des résultats de mesure. Si l'on veut tenir compte des incertitudes sur les deux mesures MES et turbidités, l'approximation peut être réalisée suivant la méthode de Williamson (1968), décrite dans (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2004). Le principe de la méthode de Williamson Least Square (WLS) consiste à minimiser la somme suivante

$$S = \sum_{i=1}^{N} \left(W(x_i)(x_i - X_i)^2 - W(y_i)(y_i - Y_i)^2 \right)$$

Équation 1

Avec (x_i, y_i) sont les points mesurés, (X_i, Y_i) les valeurs estimées, $W(x_i)$ et $W(y_i)$ les poids de x_i et y_i qui sont égaux à la variance de x_i et y_i et N est le nombre de points.

Début Novembre 2004, un muret a été construit dans l'ouvrage de décantation afin d'augmenter son efficacité. Cette construction a eu pour conséquence de modifier les relations entre la turbidité et la concentration en MES et DCO. Nous avons donc un jeu de relations correspondant à la période avant novembre 2004 et un jeu de relations après cette date. Pour chaque relation on obtient la variance (v(a)) sur la pente, (v(b)) sur l'ordonnée à l'origine et (cov(a,b)) la covariance entre a et b. Au final, nous obtenons huit relations linéaires liant la mesure de turbidité (T) avec les concentrations en MES et en DCO (C):

• Avant le 1/11/2004 :

MES/Turbidité

-	temps de pluie :	C=1.16 T –66.99, v(a)=0.02, v(b)=352.94 et cov(a,b)=-2.1	3
---	------------------	--	---

 temps sec : C=1.74 T –12.42, v(a)=0.03, v(b)=4.65 et cov(a,b))=-0.32
---	---------

DCO/ Turbidité

-	temps de pluie :	C=0.2 T + 124.54, v(a)=0.03, v(b)=1120.70 et cov(a,b)=-5.92
_	temps sec :	C=1.10 T – 1.06, v(a)=0.00, v(b)=0.00 et cov(a,b)=0.00

Après le 1/11/2004 :

MES/Turbidité

-	temps de pluie :	C=1.06 T – 43.15, v(a)=0.01, v(b)=177.32 et cov(a,b)=-0.99
-	temps sec :	C=0.53 T - 8.12, v(a)=0.00, v(b)=2.94 et cov(a,b)=-0.08
DCO/ 1	Turbidité	
-	temps de pluie :	C=0.25 T + 32.84, v(a)=0.00, v(b)=221.88 et cov(a,b)=-0.38
-	temps sec :	C=1.76 T -25.90, v(a)=0.01, v(b)=51.17 et cov(a,b)=-0.44

2.2.4 Evaluation des incertitudes

Afin d'évaluer les incertitudes sur les volumes et les masses de sédiments qui arrivent au bassin d'infiltration nous avons appliqué la loi de propagation des incertitudes. La loi de propagation des incertitudes permet d'évaluer l'incertitude u(Y):

$$u(Y)^{2} = \sum_{k=1}^{n} u(X_{k})^{2} \left(\frac{\partial f}{\partial X_{k}}\right)^{2} + 2\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} u(X_{i}, X_{j}) \left(\frac{\partial f}{\partial X_{i}}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial X_{j}}\right)$$
 Équation 2

Avec u(Xk) L'incertitude sur la grandeur mesurée Xk et u(Xi, Xj)= r (Xi, Xj) u(Xi).u(Xj) la covariance de Xi et Xj avec r (Xi, Xj) le coefficient de corrélation entre Xi et Xj, n nombre de grandeurs permettant le calcul de T.

On présentera tout d'abord les incertitudes à chaque pas de temps sur le débit, la concentration en MES et DCO, et les masses de MES et de DCO. Ensuite sera exposé le mode de calcul des incertitudes associées à chaque événement (en temps de pluie et en temps sec) et enfin des incertitudes sur toute la durée étudiée.

Incertitudes par pas de temps

Les incertitudes sur les débits mesurés sont calculées en appliquant la loi de propagation des incertitudes. La méthode est expliquée dans (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000) ou dans (NIST, 1994).

Le débit mesuré est évalué à partir d'une mesure de hauteur et de vitesse. Dans notre cas, le débit s'écoule au travers d'une section circulaire de rayon Rc, si bien que le débit peut être estimé à partir de 3 variables jugées indépendantes : R_c (rayon du collecteur), h (hauteur d'eau mesurée dans le collecteur) et U (vitesse mesurée dans le collecteur). D'après l'équation 5, l'incertitude sur le débit est donné par :

$$u(Q)^{2} = u(R_{c})^{2} (\frac{\partial Q}{\partial Rc})^{2} + u(h)^{2} (\frac{\partial Q}{\partial h})^{2} + u(U)^{2} (\frac{\partial Q}{\partial U})^{2}$$
 Équation 3

Les incertitudes sur la concentration en MES et en DCO dépendent, quant à elles, de la turbidité et des coefficients a et b de la régression linéaire réalisée au sens de Williamson. Les incertitudes sur les concentrations sont données par :

$u(c)^{2} = T^{2}v(a) + a^{2}v(T) + v(b) + 2T \operatorname{cov}(a,b)$ Équation 4

Avec u(c) l'incertitude sur la concentration de MES ou de DCO, T la turbidité mesurée en continu, v(a) et v(b) les variances de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la relation MES-turbidité ou DCOturbidité déterminées par le méthode de Williamson, cov(a,b) la covariance entre a et b et v(T) la variance de la turbidité estimée constante à 1 NTU en temps sec et en temps de pluie.

Enfin pour estimer les incertitudes sur les masses de polluants à chaque pas de temps on applique à nouveau la loi de propagation des incertitudes en prenant comme hypothèse que le volume et la concentration ne sont pas corrélés. Cette hypothèse a été justifiée en vérifiant qu'il n'y avait pas de corrélation entre le volume des événements et leur concentration moyenne (voir figure en annexe E). Comme la masse est le produit de la concentration en MES ou en DCO par le volume à chaque pas de temps, l'incertitude s'écrit alors :

$$u(m)^{2} = u(c)^{2} (\frac{\partial m}{\partial c})^{2} + u(v)^{2} (\frac{\partial m}{\partial v})^{2}$$
 Équation 5

Incertitudes par événement

Par évènement les variables dont il faut calculer les incertitudes résultent de la sommation des variables par pas de temps. Le volume V et la masse M pour un événement pluvieux ou pour une période de temps sec s'écrivent :

$$V = \sum_{i=1}^{N} v_i$$
 $M = \sum_{i=1}^{N} m_i$ Équation 6 et Équation 7

Avec V le volume d'un événement, M La masse d'un événement, vi le volume au pas de temps i , mi la masse au pas de temps i et N le nombre de pas de temps de l'événement.

Trois cas sont à distinguer pour évaluer les incertitudes pour un événement donné. Les différents cas dépendent du degré de corrélation supposé entre les différentes variables.

Variables totalement non corrélées

Dans ce cas on considère que toutes les valeurs de volume (vi) ou les valeurs de masses (mi) sont indépendantes les unes des autres. En appliquant la loi de propagation des incertitudes avec $r(vi,vj) = 0 \quad \forall i \in [1,N], \quad \forall j \in [1,N] \text{ et } i \neq j$. On obtient alors :

$$u_{Min}(V)^2 = \sum_{i=1}^{N} u(vi)^2$$
 et $u_{Min}(M)^2 = \sum_{i=1}^{N} u(mi)^2$ Équation 8 et Équation 9

En faisant cette hypothèse de non corrélation des valeurs on estimera une incertitude minimum.

Variables totalement corrélées

Dans ce cas, on fait comme hypothèse que les valeurs de volume (vi) et de masse (mi) sont totalement corrélées entre elles au cours d'un événement, c'est-à-dire que r(vi,vj) = 1 (resp. r(mi,mj)) $\forall i \in [1,N], \forall j \in [1,N]$ et i ≠ j. On obtient alors :

$$u_{Max}(V) = \sum_{i=1}^{N} u(vi)$$
 et $u_{Max}(M) = \sum_{i=1}^{N} u(mi)$ Équation 10 et Équation 11

Cette hypothèse conduit à l'estimation de l'incertitude maximum sur les volumes et les masses.

Variables partiellement corrélées

Il est possible d'estimer le degré corrélation entre les valeurs successives de volumes ou de masses. La méthode permettant d'estimer le degré de corrélation entre des valeurs chronologiques est expliquée dans (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2001). Pour cela il est nécessaire de calculer le variogramme qui permet d'estimer sur quelle durée m∆t la corrélation entre les grandeurs doit être prise en compte. Le variogramme est défini par la relation :

$$\gamma c(t) = \frac{1}{2N(m)} \sum_{i} (v_{i+m} - v_i)^2$$
 Équation 12

Avec m le nombre de pas de temps séparant deux valeurs vi et N(m) le nombre de couples de points séparés d'une durée m Δt .

Des exemples de variogrammes seront présentés ultérieurement notamment en Figure 6. On calcule ensuite la variance des N valeurs de volume vi ou de masses mi par la relation :

$$s(V)^{2} = \frac{N \sum_{i=1}^{N} vi^{2} - (\sum_{i=1}^{N} vi)^{2}}{N(N-1)}$$
 Équation 13

Cette valeur est appelée palier du variogramme. Le temps correspondant à l'intersection de la droite $y= s(V)^2$ et du variogramme donne la portée du variogramme qui représente la durée pendant laquelle le degré d'autocorrélation est significatif.

On peut ensuite calculer l'incertitude sur le débit ou la masse par la relation :

$$u_{Var}(V)^{2} = \sum_{i=1}^{N} u(vi)^{2} + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{\min(N,i+m)} r(vi,vj)u(vi)u(vj) \text{ Équation 14}$$

La Figure 6 présente un exemple de variogramme sur les volumes pour l'événement pluvieux du 14/06. Pour cet événement de 41h10 min, on a une portée de 988 min. Au final avec cette portée

on obtient des incertitudes relatives de 3.4 % sur les volumes, valeur qui est bien comprise entre l'incertitude minimale (0.5 %) et l'incertitude maximale (15.6 %).



Figure 6 : Variogramme (sur les volumes) pour l'événement du 14/06/2005

2.2.5 Incertitudes sur une série chronologique d'évènements

A partir des valeurs calculées par le variogramme (valeurs partiellement corrélées entre elles) et en prenant pour hypothèse qu'il n'y a pas de corrélation d'un événement à l'autre on peut estimer une incertitude sur les masses et sur les volumes totaux apportés pendant la période étudiée.

$$Vtot = \sum_{i=1}^{Ne} V_i$$
 $Mtot = \sum_{i=1}^{Ne} M_i$ Équation 15 et Équation 16

Avec Vtot le volume total apporté par la série d'événements, Mtot la masse totale apporté par la série d'événements, vi le volume d'un événement, mi la masse d'un événement et Ne le nombre d'événements pendant la série chronologique étudiée.

On suppose que les événements sont indépendants les uns des autres et donc qu'il n'y a pas de corrélation entre eux. Pour les événements pluvieux on prend les incertitudes de chaque événement calculées par la méthode du variogramme ($u(Vi)_{var}$ et $u(Mi)_{var}$), pour le temps sec ou lorsqu'il n'y a pas de données de qualité on utilise les incertitudes maximales de chaque événement ($u(Vi)_{max}$ et $u(Mi)_{max}$). On obtient alors :

Temps de pluie :

$$u(Vtot)^2 = \sum_{i=1}^{Ne} u(Vi)_{var}^2$$
 et $u(Mtot)^2 = \sum_{i=1}^{Ne} u(Mi)_{var}^2$ Équation 17 et Équation 18

Ne : nombre d'événements

- Temps sec ou lorsqu'il n'y a pas de mesure de qualité :

$$u(Vtot)^{2} = \sum_{i=1}^{Ne} u(Vi)_{max}^{2} \text{ et } u(Mtot)^{2} = \sum_{i=1}^{Ne} u(Mi)_{max}^{2} \qquad \text{Équation 19 et Équation 20}$$

Avec Ne : nombre de période de temps sec

2.2.6 Incertitudes sur les concentrations

Les concentrations moyennes par événement sont calculées par $C_{ev} = \frac{M_i}{V_i}$ et sur une

chronique plus longue par : $C_{ev} = \frac{Mtot}{Vtot}$

Les incertitudes sur les concentrations moyennes sont calculées respectivement par

$$u(C_{ev}) = \frac{1}{V_i} \sqrt{(u(M_i)^2 + \frac{M_i^2}{V_i^2} u(V_i)^2)}$$
Équation 21
et $u(C_{ev}) = \frac{1}{Vtot} \sqrt{(u(Mtot)^2 + \frac{Mtot^2}{Vtot^2} u(Vtot)^2)}$ Équation 22

Avec Vi le volume sur un événement, Mi la masse d'un événement, Vtot le volume total, Mtot la masse totale u(Mi), u(Vi), u(Mtot) et u(Vtot) les incertitudes associées.

2.2.7 Exemple de reconstitution des masses et des calculs d'incertitudes

Sur la période de 15 jours présentée précédemment, nous avons reconstitué les volumes et les masses de MES/DCO apportés par chaque événement, nous avons calculé les masses et les volumes totaux et nous avons évalué les incertitudes associées.

A partir de ce découpage temps sec / temps de pluie, on calcule les volumes d'eau qui arrivent au bassin d'infiltration, la masse de polluants (MES et DCO) associée et les incertitudes sur ces grandeurs pour chaque période. Les résultats des caractéristiques de chaque période sont synthétisés dans le Tableau 2.

Pour cette durée de 15 jours, on a donc deux événements pluvieux d'un volume total de 13127 m³ mesuré avec une incertitude de 3.3% et un volume de temps sec de 5240 m³ mesuré avec une incertitude de 51.5%. Le temps sec représente donc une part importante du volume qui arrive à l'ouvrage (28.5% du volume).

Cependant le temps sec ne représente qu'une petite partie de la masse de sédiments apportés à l'ouvrage. Sur cette période, 486 kg sont apportés en temps de pluie (incertitude relative de 3.0%) et

				Volume	e (m³), ince (%	ertitudes 6)	relatives	Masse de MES (kg), incertitudes relatives (%)			Masse de DCO (kg), incertitudes relatives (%)				
Туре	Début	Fin	Durée (h : min)	V (m ³)	ur min	ur vario	ur max	M MES (kg)	ur min	ur vario	ur max	M DCO (kg)	ur min	ur vario	ur max
Pluie	13/06/05 17:28	13/06/05 22:42	5:12	654	1.9	11.0	23.0	48	2.9	18.9	34.3	39.4	3.8	24.8	45.3
Sec	13/06/05 22:44	14/06/05 0:18	1:35	9	15.0		103.8	0	14.9		102.0	0.9	15.3		104.9
Pluie	14/06/05 0:20	15/06/05 17:30	41:10	12473	0.5	3.4	15.6	439	1.8	22.3	59.4	635.2	1.6	8.0	53.0
Sec	15/06/05 17:32	28/06/05 17:30	311:58	5230	0.6		51.6	38	0.9		47.0	129.0	1.6		81.7

38 kg en temps de pluie (incertitude relative de 15.8%). Sur cette période, le temps de pluie représente donc 93% des masses apportées.

Tableau 2 : Bilan de la période du 13/06/2005 au 28/06/05

2.2.8 Estimation de l'épaisseur de sédiments dans l'ouvrages

A partir des mesures de qualité en entrée de l'ouvrage

A partir des masses de MES mesurées en entrée de l'ouvrage, il est possible d'évaluer l'ordre de grandeur de la vitesse de dépôt des sédiments dans l'ouvrage ainsi que l'épaisseur de la couche de sédiments à la surface du bassin. On prendra comme hypothèse une densité des sédiments de 2.33 t/m³ (Chebbo, 1992), et une surface du fond de l'ouvrage de 8000 m². On suppose aussi que le dépôt se fera de façon homogène sur l'ensemble de la surface du bassin et qu'il n'y a pas de migration des fines en profondeur.

A partir des mesures d'épaisseur dans l'ouvrage

En juillet 2007, soit 3 ans et 3 mois après le décolmatage de l'ouvrage, l'épaisseur de la couche de sédiments a été mesurée en 97 points du bassin suivant une maille régulière de 10m par 10m. A partir de ces mesures ponctuelles nous pouvons reconstituer l'épaisseur moyenne de la couche colmatée (la méthode d'interpolation utilisée est présentée en détail au chapitre 6). L'épaisseur moyenne est égale à :

$$e = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_i S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i}$$
 Équation 23

Avec e l'épaisseur moyenne sur l'ouvrage, e_i l'épaisseur de sédiments sur la maille i et S_i la surface de la maille i.

Les incertitudes sur la reconstitution des épaisseurs sont calculées par la méthode de Monte Carlo pour 1000 simulations, en supposant que chaque épaisseur mesurée est une variable ayant une distribution normale dont l'écart type est de 1 cm et de moyenne égale à la valeur mesurée.

2.3 Evaluation de la capacité d'infiltration de l'ouvrage

2.3.1 Caractérisation du colmatage

La mesure de la conductivité par les méthodes classiques comme celle de l'anneau simple (utilisé au chapitre 2) est peu adaptée pour cet ouvrage : d'une part en raison du type de sol (fluvioglaciaire ayant une conductivité hydraulique élevée et installation difficile dans ce type de sol) et, d'autre part à cause de la variabilité spatiale de cette conductivité hydraulique qui nécessiterait un grand nombre de tests à intervalles de temps réguliers afin de quantifier la conductivité hydraulique moyenne de l'ouvrage.

Une des solutions est de déterminer l'infiltrabilité globale de l'ouvrage et d'estimer sa résistance hydraulique globale. La résistance hydraulique représente la durée nécessaire à une quantité unitaire d'eau pour passer à travers la couche colmatée sous une charge unitaire (Bouwer, 2002). Les hypothèses du modèle de Bouwer sont les suivantes (Bouwer, 1969) :

- La couche colmatée doit avoir une conductivité hydraulique faible devant la conductivité hydraulique du sol sous-jacent (voir Figure 7).
- Le sol sous jacent est donc non saturé, la nappe phréatique doit être profonde et le fond de l'ouvrage au dessus de la frange capillaire. Dans ce cas, l'écoulement dans la couche non saturée du sol sera seulement dû à la gravité et le gradient hydraulique sera égal à 1. La charge de pression est supposée constante dans la zone non saturée.



Figure 7. Infiltration dans le cas d'un bassin colmaté (figure de gauche d'après Bouwer, 2002)

Si on applique la loi de Darcy pour le système de la Figure 7 avec les hypothèses mentionnées ci-dessus on obtient le modèle de Bouwer qui donne une relation entre la vitesse d'infiltration et la hauteur d'eau dans le bassin. Cette relation est de la forme :

$$v = K_c \frac{h_0 + e - h_{cr}}{e}$$
 Équation 24

Avec v la vitesse d'infiltration, K_c la conductivité hydraulique de la couche colmatée, h₀ la hauteur d'eau dans le bassin, e l'épaisseur de la couche colmatée et h_{cr} la charge de pression dans la zone non saturée dont il existe des valeurs guides pour différents types de sol (Bouwer, 2002). Pour une grave sableuse h_{cr} peut être prise égale à -0.10 m. C'est la valeur que nous avons retenue car elle a été confirmée lors d'études antérieures sur ce même bassin (Perrodin et *al.*, 2005).

En faisant comme hypothèse que l'épaisseur de la couche colmatée est très faible par rapport à la hauteur d'eau dans le bassin on obtient l'équation de vidange suivante :

$$v = K_c \frac{h_0 - h_{cr}}{e} = \frac{h_0 - h_{cr}}{R}$$
 Équation 25
$$Q_{inf} = \frac{h_0 - h_{cr}}{R} .S$$
 Équation 26

Avec S la surface d'infiltration.

On regroupe sous un paramètre R l'épaisseur de la couche colmatée sur sa conductivité hydraulique qui représente la résistance hydraulique du bassin d'infiltration.

Notre but est de caler la résistance hydraulique pour chaque événement pluvieux afin de savoir si on observe avec le temps une augmentation globale de cette grandeur. Pour cela, nous avons besoin du débit infiltré à chaque instant. On peut le déduire de l'équation de continuité, des mesures des débits entrant dans le bassin d'infiltration et des mesures de hauteurs d'eau dans le bassin :

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_{inf}(t)$$
 Équation 27

Avec V(t) le volume stocké à l'instant t, $Q_e(t)$ débit entrant dans le bassin (mesuré) et $Q_{inf}(t)$ le débit infiltré.

Le volume d'eau dans le bassin est calculé à partir des mesures de hauteur d'eau dans celuici. Ces mesures de hauteur sont reportées sur un modèle numérique de terrain (MNT) fait avec un GPS différentiel où sont insérées les cotes exactes des sondes piézo-résistives. A partir des données topographiques, on peut définir une équation de stockage entre la hauteur d'eau dans le bassin et le volume.

On cale ensuite la résistance hydraulique par la méthode des moindres carrés en minimisant la fonction critère suivante :

$$C = \sum_{i=1}^{n} (Qinf_i - Qbouwer_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[Qinf_i - (\frac{(h_i - h_{cr})}{R} \cdot S(h_i) \right]^2$$
 Équation 28

Avec n le nombre de points de mesures, R le paramètre à caler, Q_{inf} le débit mesuré, S(hi) la surface d'infiltration, h_i la hauteur d'eau dans le bassin, h_{cr} la charge hydraulique dans la zone non saturée. La surface infiltrée S_i dépendant de la hauteur h_i est également déduite du MNT.

La résistance hydraulique est ensuite corrigée en fonction de la température de l'eau. En effet, la conductivité hydraulique d'un sol est proportionnelle à la perméabilité intrinsèque du sol k, à la masse volumique (ρ_w) et inversement proportionnelle à la viscosité dynamique de l'eau (η_w) :

$$K = k \frac{\rho_w}{\eta_w} g$$
 Équation 29

Avec g l'accélération de la gravité. La masse volumique et la viscosité dynamique dépendent de la température. Si l'on introduit la viscosité cinématique v_w définie par :

$$\upsilon_{_{W}} = \frac{\eta_{_{W}}}{\rho_{_{W}}}$$
 Équation 30

La conductivité hydraulique peut alors s'écrire comme :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{kg}{v_w}$$
 Équation 31

L'évolution de la viscosité cinématique en fonction de la température peut être approximée (pour des températures comprises entre 5°C et 40°C) par :

$$\upsilon_w(T) = -0.0239T + 1.5171$$

 $R^2 = 0.96$ Équation 32

On norme ensuite toutes les résistances hydrauliques à 20°C par la relation suivante :

$$R[20^{\circ}C] = \frac{\upsilon_{w}[20^{\circ}C]}{\upsilon_{w}[x^{\circ}C]}R[x^{\circ}C] \text{ Équation 33}$$

Avec R[20°C] la résistance hydraulique normée à 20°C, R[x°C] la résistance hydraulique à la température de l'eau lors de l'événement, v[20°C] la viscosité cinématique à 20 °C (1.005x10⁻⁶ m²/s), v[x°C] la viscosité cinématique à la température moyenne de l'eau lors de l'événement donnée par l'équation 33. La température de l'eau est quant à elle mesurée *in situ* en continu.

2.3.2 Incertitudes sur la résistance hydraulique

Principe de calcul

Afin d'évaluer l'incertitude sur le paramètre de calage, la méthode de Monte Carlo a été utilisée (Bertrand-Krajewski, 2000). En effet pour évaluer l'incertitude sur un paramètre de calage on ne peut pas utiliser la méthode classique de la loi de propagation des incertitudes. R est en effet le résultat de la recherche du minimum de la fonction critère présentée dans l'Equation 31. R n'est donc pas directement explicitable en fonction des variables qui servent à l'évaluer. Ainsi pour calculer l'incertitude commise sur R, nous avons considéré R comme une variable aléatoire fonction des variables aléatoires Qinf_i, h_i, h_{cr}. Nous avons ensuite fait l'hypothèse que la hauteur d'eau dans l'ouvrage h_i, la pression critique h_{cr} et le débit infiltré mesuré Qinf_i suivait une distribution normale de moyenne égale à la valeur mesurée (ou estimée pour h_{cr}) au pas de temps i et d'écart type égal à l'incertitude. Puis, nous avons à l'aide de la méthode de Monte Carlo, calé Ns fois la résistance

hydraulique R, non pas avec les valeurs mesurées ou estimées mais avec des valeurs tirées au hasard dans les distributions normales correspondant aux différentes variables Qinf_i, h_i, h_{cr}. Pour représenter correctement les séries statistiques, il a été nécessaire de réaliser le calage 800 fois (Ns=800). Pour chaque événement considéré, et pour chaque capteur de hauteur (k) on obtient une distribution de la résistance hydraulique avec une valeur moyenne et un écart type représentant l'incertitude u(Rk).

Dans cette procédure, nous avons considéré les incertitudes suivantes sur les différentes variables permettant le calcul de R :

- u(h_{cr}) = 5 cm : valeur maximaliste basée sur la variabilité du type de sol (sable et gravier)
- u(h_i) = 1.5 cm : valeur maximaliste qui prend en compte la précision du capteur de hauteur mais aussi l'incertitude sur son positionnement et à sa côte altimétrique
- u(Qinf_i) est calculée par la loi de propagation des incertitudes à chaque pas de temps (voir Equation 40)

La résistance hydraulique étant calculée par les données mesurées par chaque capteur (k) de hauteur (lorsque ces données existent), on obtient pour chaque événement, jusqu'à quatre valeurs de résistances hydrauliques. La résistance hydraulique du bassin associée à un événement pluvieux a été calculée comme la moyenne des calages réalisés à partir des n_c capteurs ($1 \le n_c \le 4$). L'incertitude sur la résistance hydraulique finale est donnée par l'équation 37 qui suppose une corrélation compléte des valeurs de R_k:

$$u(R) = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} u(R_k)}{n_c}$$
 Équation 34

Avec u(R_k) l'incertitude sur le calage calculée pour le capteur i, et nc : nombre de capteurs ayant servi au calage des résistances ($1 \le n_c \le 4$)

Incertitude sur le débit infiltré mesuré

Le débit infiltré mesuré est donné par l'Equation 28. Les valeurs utilisées sont des valeurs moyennes calculées sur un pas de temps de 20 min (soit n=10 mesures car on mesure les grandeurs avec un pas de temps de 2 min).

<u>Incertitudes sur le débit entrant :</u>

On calcule tout d'abord l'incertitude sur le débit entrant dans l'ouvrage $Q_e(i)$ à chaque pas de temps. Il est calculé par la loi de propagation des incertitudes comme expliqué au paragraphe 2.2.4.

Ensuite on calcule l'incertitude moyenne sur le pas de temps de 20 min. En prenant comme hypothèse que les valeurs de débits sont complètement corrélées et en appliquant la loi de propagation de incertitudes (incertitudes majorées), on a alors :

$$u(Qe) = \frac{\sum_{i=1}^{n} u(Q_e i)}{n}$$
 Équation 35
- Incertitudes sur la variation de volume

On calcule l'incertitude sur le volume d'eau dans l'ouvrage à chaque pas de temps. Celui-ci dépend, rappelons le, de la hauteur dans le bassin selon une fonction de stockage vi= $f_v(hi)$. On estime l'incertitude sur la mesure de la hauteur d'eau à 1.5 cm, soit u(h) = 1.5 cm. L'incertitude sur le volume est donné par :

$$u(vi) = u(hi) \frac{\partial f_v}{\partial h_i}$$
 Équation 36

Avec $\frac{\partial f_v}{\partial h_i}$ la dérivée de la fonction de stockage liant la hauteur et le volume

On calcule ensuite l'incertitude sur le volume d'eau moyen dans l'ouvrage. On prend comme hypothèse que les volumes d'un pas de temps à l'autre sont complètement corrélés (incertitude maximale), soit :

$$u(V) = \frac{\sum_{i=1}^{n} u(vi)}{n}$$
 Équation 37

Enfin on estime l'incertitude sur la variation de volume en prenant comme hypothèse qu'il n'y a pas de corrélation entre le volume d'eau dans le bassin sur période i et la période i+1, soit :

$$u(\frac{dV}{dt}) \approx u \frac{(V_{i+1} - V_i)}{\Delta t} = \frac{1}{dt} \sqrt{u(V_i)^2 + u(V_{i+1})^2}$$
 Équation 38

Avec dt la taille du pas de temps soit 20 min.

Incertitude sur le débit infiltré mesuré

On applique la loi de propagation des incertitudes à l'équation 30 et on obtient :

$$u(Q\inf(t)) = \sqrt{u(Qe(t))^2 + u(\frac{dV}{dt})^2}$$
 Équation 39

Il est à noter que l'on ne prend pas en compte dans ce calcul les incertitudes sur le polynôme d'approximation des volumes d'eau dans l'ouvrage et sur les pas de temps de mesure. En effet ces incertitudes sont toutes les deux négligeables par rapport aux incertitudes sur les débits et les hauteurs d'eau mesurées.

3 Résultats

3.1 Reconstitution des sollicitations

3.1.1 Reconstitution des volumes et des masses totales

Les calculs ont été faits sur une période de 42 mois entre janvier 2004 et juin 2007. On distingue deux périodes pour la reconstitution des masses, entre janvier 2004 et octobre 2004 et à partir de novembre 2004 lorsque la digue a été construite dans le bassin de décantation. L'intégralité des résultats sont présentés en annexe F (début et fin des événements, volume, masse de MES et DCO, incertitudes associées).

Il est à noter que nous ne nous intéressons pas ici à la dynamique des polluants au sein de chaque événement, mais à la masse totale de MES et de DCO apportée par chaque événement, dans l'objectif de reconstituer les apports de polluants dans l'ouvrage sur de longues périodes de temps.

Les volumes de pluie et de temps sec avec mesures de qualités (mesure de la turbidité) et les volumes sans mesure de qualité sont présentés au Tableau 1 (les résultats sont donnés selon un découpage d'environ 6 mois). En effet, pendant certaines périodes la turbidité n'est pas mesurée est cela pour différentes raisons : maintenance des sites (changement du tuyau de la pompe péristaltique, nettoyage des capteurs...), coupure d'électricité au bungalow, capteurs hors service...

Volumes totaux (m³)	Avec mesure conj	ointe de turbidité	Sans mesure conjointe de turbidité
	Pluie	Sec	Pluie + Sec
janv-oct 04	295 179	67 226	44 630
nov-juillet 05	120 390	57 856	49 549
aout-dec 05	82 747	60 615	25 946
janv-juin 06	179 908	41 296	6 633
juillet-dec 06	139 073	105 007	8 810
Jan-juin 07	196 049	54 672	1 377
Totale (m ³)	1 013 347	386 672	136 946
Total avec ou sans mesure conjointe de turbidité (m ³)	1 400 019		136 946
Total (m ³)		1 536 96	5
Répartition des volumes	65.9%	25.2%	8.9%

Tableau 1 : Répartition des volumes sur la période janvier 2004 à juin 2007

Au final les volumes reconstitués sur 3.5 ans sont les suivants :

- temps de pluie : $1 013 000 \pm 6.10^3 \text{ m}^3$
- temps sec : 387 000 ± 13.10³ m³
- volumes sans qualité : 140 000 ± 8.10³ m³
- total : 1 537 000 ± 16.10³ m³

On remarque que les incertitudes avec lesquelles sont mesurés les débits sont faibles, seulement 2% en temps de pluie, 3% en temps sec et 6% lorsqu'il n'y a pas de mesure de turbidité. D'autre part on remarque que le volume d'eau de pluie arrivant à l'ouvrage ne représente que les ²/₃ des volumes d'eau ayant des mesures de qualité. Le temps sec représente ¹/₄ des volumes et presque 10% des volumes totaux n'ont pas de mesure de turbidité.

Les masses de sédiments et de DCO apportés à l'ouvrage par temps sec et par temps de pluie sont présentées dans le Tableau 2.

Masses totales	Sédimer	nts (kg)	DCC) (kg)	
	Pluie	Sec	Pluie	Sec	
janv-oct 04	10 652	4 556	88	3317	
nov-juillet 05	6 935	836	6669	2825	
aout-dec 05	3 729	2 194	4347	7345	
janv-juin 06	12 495	415	10510	1406	
juillet-dec 06	3 341	2 601	6423	8705	
jan-juin 07	7 905	1 366	9876	4569	
Totale (kg)	45 058	11 968	37913	28166	
Total (kg)	57 0	26	66 080		
Répartition des masses	79.0%	21.0%	57.4%	42.6%	

Tableau 2 : Répartition des masses de sédiments et de DCO sur la période janvier 2004 à juin 2007

Au final les masses de sédiments sont les suivantes :

- temps de pluie : $45.1 \pm 1.3 t$
- temps sec : 12.0 ± 0.9 t
- total : 57.0 ± 1.6 t

Comme pour les volumes, les incertitudes sur les masses de sédiments sont très faibles, seulement 3% en temps de pluie et 8% en temps sec. On remarque que ce sont principalement les eaux de pluie qui amènent des sédiments à l'ouvrage (presque 80% en masse). Au final, c'est donc presque 60 t de sédiments sur une durée de 3.5 ans, qui sont piégés par l'ouvrage d'infiltration et qui ne vont pas vers les milieux récepteurs.

Au final on a une masse totale de DCO de

- temps de pluie : 37.9 ± 1.0 t
- temps sec : 28.2 ± 1.5 t
- total : 66.1 ± 1.8 t

Comme pour les autres grandeurs mesurées, les incertitudes sont très faibles, 3% en temps de pluie et 5% en temps sec. On remarque que la DCO apportée par le temps sec, représente une part plus importante que les MES de temps sec. La DCO de temps de pluie ne représente que 57% de la DCO totale quand les MES de temps de pluie représente 79% des MES totales.



Les concentrations moyennes en MES et DCO sur le durée totale de l'étude sont présentées dans le Tableau 3.

	1150	500
Concentration moyenne (mg/l)	MES	DCO
Temps de pluie	44	37
Temps sec	31	73
Moyenne	41	47

Tableau 3 : Concentration moyenne en MES et DCO par temps de pluie et par temps sec

Au final, les concentrations moyennes sont les suivantes

- temps de pluie : MES : 44 ± 1 mg/l et DCO : 37 ± 1 mg/l
- temps sec : MES : 31 ± 3 mg/l et DCO : 73 ± 5 mg/l
- moyenne : MES : 41 ± 3 mg/l et DCO : 47 ± 5 mg/l

Notons que les incertitudes sont faibles lorsque le taux de couverture des événements est bon. Cependant, nous ne tenons pas compte de l'incertitude liée à la couverture imparfaite des événements. L'effort de mesure est donc à porter sur une bonne continuité des mesures.

3.1.2 Epaisseur de sédiments dans l'ouvrage

A partir de la masse de sédiments calculée dans la partie précédente il est possible d'estimer l'épaisseur moyenne de la couche colmatée dans l'ouvrage. En prenant comme hypothèse un dépôt homogène sur l'ensemble de la surface du bassin, on calcule qu'il a pu se déposer une couche de 3.1 mm de sédiments en 3.5 ans. Cette couche représente l'accumulation minimale. En effet, la masse de sédiments apportée et reconstituée à partir des mesures de turbidité est sous estimée car seules les mesures avec des mesures de qualité et de débits conjoints sont utilisées. Ainsi, lorsqu'il n'y a pas de mesures de débits ou en l'absence de mesure de turbidité, les sédiments apportés par les eaux de ruissellement ne sont pas quantifiés. Le taux d'accumulation annuelle est alors égale à : $e \approx 0.9 \text{ mm} / \text{an}$.

Les prélèvements de sol montre que la couche de sédiments était plus épaisse dans les points bas du bassin ainsi que dans les zones en entrée de l'ouvrage qui sont plus régulièrement sollicitées. La reconstitution des masses aboutit a une épaisseur moyenne mesurée de : e (3.5 ans) \approx 10.6 ± 1.5 mm (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Soit un taux d'accumulation annuelle égale à : e \approx 3.5 mm/ an.



Figure 8 : Résultats des 1000 simulations de reconstitution des épaisseurs moyennes à la surface du bassin

Cette valeur est trois fois supérieure à la valeur estimer par mesure des apports. Cela est dû à une surestimation de l'épaisseur de sédiments à la surface de l'ouvrage. En effet, la mesure de l'épaisseur de la couche colmatée est souvent difficile. Les zones peuvent être en eau ce qui rend la mesure peu précise, la végétation dense dans certaines zones crée un tapis de racine qui se mélange avec la couche de sédiments....

Cependant nous trouvons des résultats du même ordre de grandeur, de l'ordre du mm à quelques mm par an. On peut donc estimer que le taux d'accumulation moyen annuel de sédiments à la surface de l'ouvrage est millimétrique et compris entre 1 et 3.5 mm.

3.2 Evolution hydraulique

3.2.1 Calage d'un modèle d'infiltration

Conditions de choix des événements

Le point bas du bassin se trouvant à une côte 60 cm inférieure à l'entrée du bassin (à l'emplacement du capteur 4) et afin de mesurer les variations de hauteur avec suffisamment de précision, on ne sélectionne que les événements ayant une hauteur d'eau maximale au moins égale à 100 cm par rapport au fond du bassin soit 40 cm par rapport au capteur 1.

De plus cette condition de hauteur (h>100 cm) assure la pertinence de la comparaison des résistances entre elles. En effet, lors de tels évènements, tout le fond du bassin est en eau. Si ce n'était pas le cas, la résistance calée pourrait correspondre à des parties différentes du bassin qui sont, on le sait, différemment colmatées et dont les surfaces sont très mal approchées avec la méthode existante.

Le calage a donc été réalisé sur un total de 20 événements répartis entre décembre 2003 et juin 2007.

Relation surface - hauteur et volume - hauteur

Pour chaque événement les hauteurs mesurées à chaque pas de temps sont utilisées pour calculer la surface qui participe à l'infiltration, et le volume d'eau dans l'ouvrage. Les relations surface / hauteur et volume / hauteur sont données à la Figure 9. Ces surfaces et volumes ont été calculés à partir du MNT puis approximés par des polynômes.



Figure 9 : Relation surface infiltrée et volume et fonction de la hauteur d'eau dans l'ouvrage

Résultats des calages

Les calages se font uniquement sur la décrue de chaque événement, c'est-à-dire à partir de l'instant où la hauteur d'eau est maximale dans le bassin. Les valeurs de hauteur utilisées pour le calage sont les valeurs mesurées, corrigées par rapport à la côte de fond de bassin. L'ouvrage a été décolmaté début avril 2004. Le * incertitude relative sur incertitude élargie

Tableau 4 présente pour chaque événement la résistance hydraulique de l'ouvrage en heures, corrigée à 20°C, le degré de corrélation entre débit mesuré et débit simulé (r²), le capteur utilisé pour le calage, l'incertitude relative, l'écart type, les bornes de l'intervalle de confiance à 95% (R_{min} et R_{max}) et les hauteurs maximales et minimales dans l'ouvrage.



Date	Capteur	R(h)	٢²	ur (%)*	u (R)	Rmin	Rmax	hmax (cm)	hmin (cm)
18/01/04	C1	29.2	0.70	44.6	6.5	16.1	42.2	44	19
20/01/04	C1	25.5	0.92	35.7	4.6	16.4	34.6	75	15
23/02/04	C1	18.9	0.95	33.1	3.1	12.7	25.2	98	16
14/03/04	C1	15.3	0.98	27.6	2.1	11.0	19.5	123	16
23/03/04	C1	28.0	0.70	51.7	7.2	13.6	42.5	44	24
10/10/04	C1	5.4	0.89	39.1	1.0	3.3	7.4	51	12
26/10/04	C1	6.1	0.96	14.5	0.4	5.2	7.0	82	13
4/11/05	C1	6.2	0.94	24.1	0.7	4.7	7.6	63	16
	C2	5.5	0.99	21.1	0.6	4.4	6.7	77	13
	C3	5.2	0.99	21.8	0.6	4.1	6.4	82	16
	C4	5.3	1.00	22.5	0.6	4.1	6.5	115	48
20/02/06	C1	9.5	0.91	31.5	1.5	6.5	12.5	45	20
	C2	7.8	0.94	28.9	1.1	5.6	10.1	57	32
	C3	7.4	0.94	29.4	1.1	5.2	9.6	64	40
	C4	7.5	0.94	27.2	1.0	5.4	9.5	97	39
28/03/06	C3	8.2	0.98	24.4	1.0	6.2	10.2	86	20
	C4	8.5	0.98	23.7	1.0	6.5	10.5	120	54
10/04/06	C1	9.5	0.98	21.2	1.0	7.5	11.5	90	12
	C2	9.6	0.99	22.5	1.1	7.4	11.7	101	23
	C3	9.4	0.98	20.8	1.0	7.5	11.4	109	32
	C4	9.8	0.94	22.3	1.1	7.6	12.0	142	65
6/07/06	C1	10.1	0.96	27.2	1.4	7.4	12.9	69	17
	C2	10.7	0.72	28.5	1.5	7.6	13.7	82	31
	C3	9.6	0.97	27.6	1.3	7.0	12.3	86	32
	C4	6.4	0.96	28.9	0.9	4.6	8.2	125	70
18/08/06	C1	18.8	0.97	38.1	3.6	11.6	26.0	59	26
	C2	13.9	0.97	33.3	2.3	9.3	18.5	72	14
	C3	13.16	0.98	30.7	2.0	9.1	17.2	76	14
	C4	13.53	0.97	31.4	2.1	9.3	17.8	115	50
15/09/06	C1	10.3	0.87	29.0	1.5	7.3	13.3	58	38
	C2	7.5	0.93	24.6	0.9	5.7	9.4	74	21
	0.4	0.9	0.93	24.5	0.8	5.2	8.0	78	20
47/44/00	04	7.3	0.92	23.4	0.8	5.0	9.0	70	00
17/11/06		0.3	0.88	23.8	0.7	4.8	7.8	72	25
6/12/06	C1	0.0	0.02	24.0	0.0	5.0	12.0	07	
0/12/00	C1	10.6	0.90	24.0	1.4	0.4	12.9	102	21
	C4	10.0	0.99	24.0	1.5	8.0	12.2	142	60
8/12/06	C1	12.4	0.33	34.8	2.2	8.2	17.0	67	21
0/12/00	C2	13.8	0.00	35.8	2.2	8.8	18.7	82	35
	C3	12.6	0.95	36.1	2.3	8.1	17.2	88	41
	C4	9.1	0.95	32.9	1.5	6.1	12.0	123	76
15/05/07	C1	6.5	0.79	28.3	0.9	4.6	83	44	20
	C2	5.9	0.76	26.1	0.8	4.4	7.5	66	27
	C3	5.3	0.75	25.9	0.7	3.9	6.6	69	24
	C4	5.5	0.71	22.9	0.6	4.2	6.8	104	58
17/05/07	C1	10.1	0.95	27.8	1.4	7.3	12.8	62	21
	C2	9.2	0.97	28.5	1.3	6.6	11.8	71	19
	C3	8.5	0.94	26.4	1.1	6.2	10.7	77	19
	C4	8.8	0.97	24.8	1.1	6.6	10.9	118	55

* incertitude relative sur incertitude élargie

Tableau 4: Résultats des calages entre décembre 2003 et juin 2007 (Date de l'évènement, Numéro du capteur utilisé pour le calage, résistance hydraulique à 20°C en heures, coefficient de corrélation entre débit mesuré et débit simulé (r²), incertitude relative (ur), incertitude absolue, bornes minimales et maximales de l'intervalle de confiance à 95%, hauteurs maximales et minimales dans l'ouvrage lors de l'évènement).

Corrélation entre débit mesuré et simulé

On remarque généralement une très bonne corrélation entre le débit mesuré et le débit simulé (r^2 moyen = 0.92, σ = 0.08 pour n=50). Un exemple de calage est présenté en Figure 10, avec à gauche le débit simulé en fonction du débit infiltré et à droite l'évolution de ces débits en fonction du temps. Le modèle de Bouwer semble être satisfaisant pour évaluer le comportement d'un ouvrage et représenter le débit d'infiltration dans l'ouvrage.



Figure 10 : Exemple de calage sur l'événement du 4 novembre 2005 (capteur 4)

Incertitudes sur la résistance hydraulique

Les incertitudes sur la résistance hydraulique sont présentées dans le * incertitude relative sur incertitude élargie

Tableau 4. Un exemple de résultats de la simulation par la méthode de Monte Carlo est présenté à la Figure 11. Cet exemple présente la distribution des résistances hydrauliques pour 800 simulations de calage pour l'événement du 17 mai 2007 (hauteurs mesurées avec le capteur 4). La résistance hydraulique moyenne est de 8.7 h et l'incertitude relative est de 25% (σ =1.1h).



Figure 11 : Distribution des résistances hydrauliques pour 800 simulations (événement du 17/05/07, capteur 4), Rmoy= 8.8h, σ =1.1h

Influence du choix du capteur

Les quatre capteurs piézorésistifs installés dans le bassin sont indépendants et sont tous situés à des côtes différentes. Le modèle a été calé avec les données de chaque capteur (lorsque les données sont disponibles), corrigées par rapport au fond du bassin. Les valeurs moyennes du paramètre de calage ainsi que leur coefficient de variation sont présentés dans le Tableau 5.

Date	Rmoy (h)	Cv (%)	u _r (R) %	n _c
4/11/05	5.6	7.5%	22%	4
20/02/06	8.0	12.2%	29%	4
10/04/06	9.6	1.5%	22%	4
6/07/06	9.2	20.8%	28%	4
18/08/06	14.8	17.9%	34%	4
15/09/06	8.0	19.7%	26%	4
6/12/06	10.7	3.5%	18%	3
8/12/06	12.0	17.1%	35%	4
15/05/07	5.8	9.0%	26%	4
17/05/07	9.1	7.6%	27%	4

Tableau 5 : Résistance hydraulique moyenne, coefficient de variation et incertitude relative (ur(R))

Les coefficients de variations sont en moyenne de 11.7 % (ne=10). Cette faible valeur montre que le calage ne dépend pas trop du capteur, les capteurs donnant des résultats similaires. De plus l'incertitude calculé sur la résistance hydraulique est toujours supérieure (moyenne de $u_r(R)$ = 26.7%) au coefficient de variation. Cela montre également que l'incertitude sur la mesure est supérieure à la variabilité liée à l'emplacement du capteur où est faite la mesure.

Evolution du paramètre de calage en fonction du temps

L'évolution de la résistance hydraulique en fonction du temps est présentée à la Figure 12.



Figure 12 : Evolution de la résistance hydraulique en fonction du temps

Entre décembre 2003 et jusqu'à fin mars 2004, l'ouvrage était colmaté. Les résultats du calage sur cette période donnent des valeurs de R comprises entre 15.3 h à 29.2 h avec une valeur moyenne de 23.4 h et un coefficient de variation de 23% (pour n=6). Ces valeurs élevées confirment que l'ouvrage présentait des signes importants de colmatage.

Début avril 2004, l'ouvrage a été décolmaté, c'est-à-dire que les premiers centimètres de l'ouvrage ont été décapés. Ce décolmatage se traduit par une chute de la résistance hydraulique (soit une augmentation de la conductivité hydraulique) dans les mois qui suivent cette opération. Entre avril 2004 et novembre 2005, la résistance hydraulique moyenne est de 5.7 h avec un coefficient de variation de 7 % (n=3). Il est à noter que sur cette période de 20 mois, la conductivité hydraulique étant très élevée, le modèle n'a pu être calé que sur peu d'événements (conditions non optimales pour appliquer le modèle de Bouwer c'est-à-dire hauteurs faibles, épaisseur de colmatage quasi inexistante).

A partir de février 2006 et jusqu'à juin 2007 (soit une période de 16 mois) onze événements ont produit des hauteurs d'eau suffisantes pour caler le modèle. Sur cette période, la résistance hydraulique moyenne est de 9.3 h avec un coefficient de variation de 28% (n=11). Cette résistance moyenne est statistiquement supérieure à la valeur précédente (t-Test, p=0.002). La résistance a donc globalement augmenté. Cependant il ne semble pas y avoir de tendance claire pour l'évolution de la résistance hydraulique avec le temps et les dernières valeurs sont encore très faibles par rapport aux valeurs avant décolmatage.

Après trois ans et demi de fonctionnement de l'ouvrage, on peut donc conclure qu'il semble encore fonctionner correctement.

3.2.2 Etude des hauteurs d'eau en fonction du temps

Evolution globale

Le modèle ne pouvant être utilisé lorsque les hauteurs d'eau dans l'ouvrage sont faibles, il est intéressant d'étudier la variation des hauteurs d'eau maximales dans l'ouvrage avec le temps y compris quand les hauteurs sont faibles. Cela nous permettra d'identifier si localement (zones les plus sollicitées par ces faibles hauteurs) présentent également une tendance au colmatage.

Afin d'étudier les variations de hauteur d'eau avec le temps, il est nécessaire de créer des classes d'événements similaires en terme de volume et de durée. Dans un premier temps, 14 événements ont été sélectionnés, ayant un volume supérieur à 14000 m³ et inférieur à 19000 m³ et une durée comprise entre 14 h et 53 h. Ces événements sont présentés dans le Tableau 6.

Evénements d'infiltration								Pluies	
# événement	Début	Fin	Durée (h:min)	Volume (m ³)	Q _{inf moy} (m ³ /s)	h _{max} (cm)	Durée (min)	Hauteur (mm)	
2	22/02/2004 14:56	23/02/2004 21:02	30:06	18854	0.17	98	1177	39.2	
4	22/04/2004 23:04	23/04/2004 13:04	14:00	14450	0.292	26	377	21.8	
10	6/10/2004 10:22	7/10/2004 2:16	15:54	16070	0.280	26	1043	35.4	
16	23/01/2005 17:30	24/01/2005 19:30	26:00	16287	0.07	16	2198	24	
24	18/10/2005 20:08	20/10/2005 7:16	35:08	18934	0.15	32	890	31	
26	31/10/2005 22:08	2/11/2005 5:02	30:54	18362	0.16	39			
29	15/02/2006 12:12	17/02/2006 8:16	44:04	17338	0.11	21	779	22.2	
30	19/02/2006 15:12	21/02/2006 2:06	34:54	16046	0.13	45	780	28.4	
37	6/07/2006 0:18	7/07/2006 22:18	46:00	16859	0.10	69	417	34	
38	3/08/2006 0:24	5/08/2006 4:52	52:28	15104	0.08	40	1983	30.6	
40	17/08/2006 0:00	19/08/2006 1:12	49:12	18535	0.10	61	1538	26	
45	6/12/2006 2:48	7/12/2006 11:16	32:28	17953	0.15	87	725	35.95	
46	8/12/2006 13:34	10/12/2006 6:48	41:14	15417	0.10	68	805	19.79	
52	16/05/2007 23:14	18/05/2007 16:30	41:16	18879	0.13	63	1917	31.61	
	Moyenne		35:15	17078	0.15		421	29	

Tableau 6 : Caractéristiques des événements de même classe avec $Q_{inf moy}$ le débit infiltré moyen pendant l'événement, h_{max} la hauteur maximum dans l'ouvrage

La Figure 13 présente l'évolution de ces hauteurs maximales en fonction du temps. On remarque tout d'abord une diminution de la hauteur maximum après décolmatage du bassin : 98 cm avant décolmatage, 26 cm après. La hauteur maximale semble rester assez constante entre avril 2004 et janvier 2005, avec une hauteur moyenne de 23 cm (σ =6 cm, n=3). A partir d'octobre 2005, il semble y avoir une augmentation de cette hauteur en fonction du temps : d'une trentaine de centimètres en octobre 2005, on passe à des valeurs en moyenne supérieures à 60 cm à partir d'août 2006 (atteignant même 87 cm en décembre 2006).



Figure 13 : Evolution de la hauteur d'eau maximum en fonction du temps

Cette première analyse globale semble donc confirmer les résultats du calage du modèle de Bouwer qui montrent une résistance hydraulique faible est assez constante après décolmatage (entre avril 2004 et novembre 2005), puis une tendance à l'augmentation à partir de février 2006.

Comparaison événement par événement

Dans un deuxième temps, les événements ont été comparés deux à deux de manière à comparer l'évolution des hauteurs pour des évènements " équivalents " dont la similarité est définie de manière plus drastique. Ainsi deux évènements sont considérés comme équivalents si la différence de volumes est inférieure à 2500 m³ et si la différence de durées entre les événements est inférieure à 5h. Seuls les événements supérieurs à 15 000 m³ ont été sélectionnés soit un groupe de 14 événements (Tableau 7).

Evénements équivalents proches dans le temps :

- #24 et #26 : 13 jours entre les deux événements et une différence de hauteur de 7 cm sur une trentaine de cm (octobre 2005),
- #37 et #40 : 41 jours entre les deux événements et une différence de hauteur de 8 cm sur une soixantaine de cm (juillet - août 2006).

Il semble ne pas y avoir de différence de hauteur maximum significative pour ces deux couples d'événements. Des événements similaires et proches dans le temps produisent des valeurs de hauteur d'eau maximale dans l'ouvrage relativement proches. La différence d'environ 10 cm est suffisamment faible et peut s'expliquer par les écarts entre les événements dits similaires et par les incertitudes sur les mesures utilisées pour les définir.

# événement	Début	Durée (h:min)	Volume (m ³)	hmax (cm)
2*	22/02/04	30:06	18854	98
16	23/01/05	26:00	16287	16
18	7/04/05	55:32	18407	25
24	18/10/05	35:08	18934	32
26	31/10/05	30:54	18362	39
29	15/02/06	44:04	17338	21
30	19/02/06	34:54	16046	45
37	6/07/06	46:00	16859	69
38	3/08/06	52:28	15104	40
40	17/08/06	49:12	18535	61
42	15/09/06	41:56	21941	62
45	6/12/06	32:28	17953	87
46	8/12/06	41:14	15417	68
52	16/05/07	41:16	18879	63
	Min	26:00	15104	16
	Max	55:32	21941	98
	Moyenne	40:05	17780	
	écart type	8:52	1784	

*avant décolmatage de l'ouvrage

Tableau 7 : Evénements supérieures à 15 000 m3

Evénements équivalents écartés dans le temps :

- Entre des événements situés avant et après décolmatage du bassin :
- #2 et #26 : diminution de 59 cm entre février 2004 et octobre 2005 montrant clairement l'effet du décolmatage
- #2 et #45 : diminution de 11 cm entre février 2004 et décembre 2006

On remarque une nette diminution de la hauteur maximale après décolmatage de l'ouvrage, puis cette différence diminue avec le temps.

- Après décolmatage de l'ouvrage
- #16 et #26 : augmentation de 23 cm (h_{26} =2.4 h_{16}) entre janvier 2005 et octobre 2005
- #30 et #45 : augmentation de 42 cm (h_{30} =1.9 h_{45}) entre février 2005 et décembre 2006
- #26 et #45 : augmentation de 55 cm (h_{26} =2.2 h_{45}) entre octobre 2005 et décembre 2006
- #29 et #46 : augmentation de 48 cm (h_{29} =3.2 h_{46}) entre février 2006 et décembre 2006
- #29, #37, #52 : augmentation de 48 cm (h₂₉=3.3 h₃₇) entre février 2006 et août 2006, puis diminution de 6 cm (h₃₇=0.9 h₅₂) entre août 2006 et mai 2007

Dans tous les cas, la hauteur maximale dans l'ouvrage augmente avec le temps au moins jusqu'en décembre 2006, puis on observe une stagnation de la hauteur maximale après cette date.

3.2.3 Influence des apports sur le fonctionnement de l'ouvrage

Afin de voir s'il est possible de mettre en relation l'évolution hydraulique du bassin avec les sollicitations auxquelles il est soumis, nous avons calculé :

- le volume (V) écoulé entre deux événements calés (pour le premier événement, le volume entre cet événement et le 1 avril 2004)
- le volume cumulé (V_{cumulé}) depuis le décapage de l'ouvrage
- la masse (M) de sédiments apportés à l'ouvrage entre deux événements
- la masse cumulée (M_{cumulée}) de sédiments depuis le décapage de l'ouvrage

Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

# événement	Date	R (h)	V (m ³)	V _{cumulé} (m ³)	M (kg)	M _{cumulée} (kg)
1	10-Oct-04	5.4	165250	165250	7743	7743
2	26-Oct-04	6.1	37284	202534	1474	9217
3	4-Nov-05	5.6	401304	603838	11598	20815
4	20-Feb-06	8.0	131414	735252	9779	30594
5	28-Mar-06	8.4	60600	795852	2721	33315
6	10-Apr-06	9.6	35065	830917	1170	34485
7	6-Jul-06	9.2	94530	925447	3848	38333
8	18-Aug-06	14.8	62203	987650	421	38754
9	15-Sep-06	8.0	25379	1013029	2313	41067
10	17-Nov-06	6.4	60542	1073571	773	41840
11	6-Dec-06	10.7	45840	1119411	382	42222
12	8-Dec-06	12.0	21801	1141212	1244	43466
13	15-May-07	5.8	136525	1277737	5913	49379
14	17-May-07	9.1	32324	1310061	1702	51081

Tableau 8 : Evolution de la résistance hydraulique en fonction du volume écoulé entre deux calages, du volume cumulé, de la masse de sédiments apportés entre deux calages et de la masse de sédiments cumulée

En l'état des données, les coefficients de corrélation entre la résistance hydraulique (et les hauteurs d'eau dans l'ouvrage) et les différentes grandeurs caractéristiques des apports (volume d'eau et masse de sédiments) sont présentés dans le Tableau 9. La corrélation est mauvaise lorsque l'on travaille avec les résistances hydrauliques mais elle est meilleure lorsque l'on calcule avec les hauteurs d'eau maximales mesurées dans l'ouvrage ($r^2 = 0.65$ entre hauteurs et volumes cumulés et 0.64 entre hauteurs et masses cumulées). Des études permettant de combler différement les lacunes ont été testées mais donnent des résultats similaires en terme de tendance (Gonzalez-Merchan, 2008).

	V (m ³)	V cumulé (m ³)	M (kg)	M cumulé (kg)
r² (résistances hydrauliques)	0.23	0.20	0.32	0.21
r² (hauteurs d'eau max. dans le bassin)	0	0.65	0.01	0.64

Tableau 9 : Coefficient de corrélation entre la résistance hydraulique (ou hauteurs mesurées dans l'ouvrage et les différents apports (n=14)

4 Discussion

4.1 Qualité des eaux de ruissellement

La concentration moyenne de temps sec de 44 mg/l est assez faible par rapport aux valeurs habituellement trouvées dans la littérature pour des bassins versants de type industriel ou routier qui sont de l'ordre de 150 mg/l (Kayhanian *et al.*, 2003 ; Ackerman *et al.*, 2003 ; Barbosa *et al.*, 1999 ; Flint et Davis, 2007 ; Duncan, 1999 par exemple). Cependant l'eau passant au préalable par le bassin de décantation, la valeur moyenne trouvée semble acceptable. Les concentrations moyennes en MES par temps de pluie et de temps sec sont très proches.

Les concentrations moyennes en DCO de temps sec (73 mg/l) sont presque deux fois plus forte que la concentration de temps de pluie (37 mg/l). On remarque donc l'importance du temps sec sur la masse de DCO apportée à l'ouvrage. Comme pour les MES, la concentration moyenne est plus faible que les valeurs trouvées habituellement dans les eaux de ruissellement qui sont de l'ordre de 100 à 150 mg/l (Kayhanian *et al.*, 2003 ; Göbel *et al.*, 2007 par exemple).

4.2 Evaluation des masses de sédiments dans l'ouvrage

L'étude des sollicitations apportées à l'ouvrage a permis d'estimer les volumes et les masses de sédiments et de DCO avec une faible incertitude quand la couverture des événements est bonne. L'ouvrage d'infiltration a retenu 57 t de sédiments et reçu 66 t de DCO sur une durée de 3.5 ans.

La quantification des masses de sédiments apportés au bassin permet d'estimer l'épaisseur de la couche colmatée à la surface de l'ouvrage. Cette estimation à partir de la qualité des entrées peut ensuite être comparée à l'épaisseur de la couche colmatée mesurée à la surface de l'ouvrage. Le taux d'accumulation estimé à partir des mesures de turbidité en entrée du bassin est d'environ 1 mm/an. Il est d'environ 3.5 mm/an à partir des épaisseurs mesurées dans le bassin. Le taux d'accumulation annuel est donc millimétrique.

4.3 Evolution de la conductivité hydraulique avec le temps

Le modèle utilisé pour évaluer la résistance hydraulique globale de l'ouvrage permet d'estimer l'état de l'ouvrage. Les résultats du calage et l'analyse des hauteurs d'eau dans l'ouvrage sur des événements similaires ont montré :

- des résistances hydrauliques et des hauteurs d'eau importantes lorsque l'ouvrage est colmaté,
- des résistances hydrauliques et des hauteurs d'eau faibles après décolmatage de l'ouvrage, puis sur une période d'environ 20 mois,

 après cette période, une augmentation moyenne des résistances hydrauliques et importante des hauteurs d'eau maximales dans l'ouvrage, mais qui restent inférieures aux valeurs avant décolmatage.

Il est donc possible de suivre la capacité d'infiltration de l'ouvrage. On remarque une modification de son fonctionnement au cours de temps qui se traduit par des résistances hydrauliques plus élevées et des hauteurs d'eau maximales dans l'ouvrage qui augmentent. Cependant la période d'étude n'est pas assez longue pour pouvoir atteindre à nouveau un état de colmatage de l'ouvrage et ainsi mesurer la durée de vie de l'ouvrage. Après trois années et demi de service depuis son décolmatage, l'ouvrage semble encore bien fonctionner et ne semble par présenter de risque en cas d'événement pluvieux important.

4.4 Corrélation entre colmatage et qualité des apports

La corrélation entre les résistances hydrauliques calées et les apports (volumes et masses de sédiments, volumes et masses cumulées) est faible. Cependant la corrélation entre les hauteurs maximales dans l'ouvrage (pour des événements forts et similaires) avec les volumes cumulés et les masses cumulées est correcte (R²=0.65). Cela montre que l'évolution de la capacité à infiltrer est en partie corrélée avec le volume d'eau et la masse de sédiments qui arrivent à l'ouvrage, mais que ces facteurs ne suffisent pas à expliquer seuls le colmatage. Des facteurs comme la corrélation avec la matière organique, qui n'a pu être effectuée faute de temps, aurait été intéressante. L'amélioration des facteurs permettant d'expliquer l'évolution du colmatage passera donc par une amélioration de la couverture des mesures en continu et par le suivi d'autres facteurs notamment ceux induisant le colmatage biologique (ensoleillement par exemple).



5 Conclusions

Le dispositif mis en place a permis de mesurer sur une longue période de temps les variations de son comportement via le calage de la résistance hydraulique globale du bassin selon le modèle de Bouwer. Parallèlement les sollicitations ou facteurs d'environnement majeurs ont été suivis (débits, turbidités, pH, températures d'eau, ...) de manière fine (pas de temps de 2 minutes). Si l'approche par calage de la résistance hydraulique n'est pas originale car déjà entreprise par Gautier (1998) ou Dechesne (2002), l'apport principal du travail dans ce domaine, réside dans le fait de suivre un même ouvrage dans le temps (et non différents ouvrages supposés similaires mais d'âges différents) et surtout de suivre avec précision et en permanence l'ensemble des sollicitations du bassin et des variables pilotant son fonctionnement.

La recherche menée confirme que, pour de grands ouvrages, la résistance hydraulique globale calée selon le modèle de Bouwer est un bon indicateur du colmatage et discrimine parfaitement un état colmaté d'un état peu colmaté. Après décolmatage et sur 3.5 ans, la résistance hydraulique tend à augmenter légèrement avec de petites fluctuations que l'on explique encore mal mais qui peuvent être dues soit à la méthode, soit à des fluctuations saisonnières (colmatage biologique) soit encore à des changements de végétalisation du bassin. En effet le fond de l'ouvrage est nu mais une végétation « sauvage » se développe périodiquement et est enlevée par la gestionnaire. Cependant sur une période de 3.5 ans la résistance a peu évolué (de 6h à 9h). Le phénomène de colmatage est donc lent. Il est également très disparate à la surface de l'ouvrage. Des zones en eau se développent dans les parties les plus sollicitées semblant indiquer un colmatage important. Cependant ce colmatage est localisé, l'eau ruisselle alors et s'épand sur une surface plus importante et ainsi de suite jusqu'au colmatage de la totalité du fond. Dans le cas du colmatage total du fond, l'eau percole encore par les berges. Ces observations peuvent être précieuses pour le gestionnaire qui peut alors mettre en place des stratégies d'entretien dont la périodicité dépend de la zone considérée (e.g. tous les ans pour les zones fortement sollicitées et tous les 5 à 10 ans sur les autres).

La recherche confirme également à partir de données fiables que le modèle de Bouwer est bien adapté à la modélisation hydraulique de ces grands bassins qui se colmatent progessivement.

Si l'on met en regard l'évolution du colmatage avec les caractéristiques des apports, l'étude montre que ni le volume d'eau reçu entre deux évènements, ni le volume cumulé depuis le décolmatage du bassin, ni la masse des MES apportée entre deux évènements, ni sa masse cumulée ne suffit à expliquer ou à prédire statistiquement les variations. Il semble y avoir une bonne corrélation entre l'évolution des hauteurs d'eau maximales dans l'ouvrage et les masses de sédiments apportés à l'ouvrage. Le rôle des MES sur le colmatage est donc montré mais n'est pas suffisant pour expliquer les variations. La reconstitution des apports de MES a été faite de manière fine. La qualité des données recueillies notamment grâce à une maintenance régulière des capteurs de mesures, à une

analyse fine des incertitudes et de leur propagation a permis d'évaluer les masses de MES et de DCO dans une gamme d'incertitude très faible. Cependant, le rôle des MES ou de la DCO seule n'est pas suffisant pour expliquer le colmatage et d'autres facteurs seraient à étudier (ensoleillement, présence de végétation, apports en autres polluants pouvant réagir avec l'interface et expliquer la part biologique du colmatage).... De plus, il serait nécessaire de suivre ces paramètres le plus continûment possible, les lacunes dans les données étant la première source d'incertitude dans l'évaluation des masses de polluants. Enfin d'autres bassins devraient être instrumentés et suivis dans des conditions similaires pour pouvoir dresser des conclusions plus générales.

References

- ACKERMAN D. ET SCHIFF K. (2003). Modelling storm water mass emissions to the Southern California Bight. Journal of Environmental Engineering, vol. 129, n° 4, pp. 308-317.
- BARBOSA A. E. ET HVITVED-JACOBSEN T. (1999). Highway runoff and potential for removal of heavy metals in an infiltration pond in Portugal. The Science of the Total Environment, vol. 235, pp. 151-159.
- BARRAUD S., GIBERT J., WINIARSKI T., BERTRAND KRAJEWSKI J.-L. (2002). Implementation of a monitoring system to measure impact of stormwater runoff infiltration, *Water Science and Technology*, 45 (3), 2002, 203-210.
- BARRETT M ET TAYLOR S (2004). Retrofit of storm water treatment controls in a highway environment. 5th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, Novatech 2004, June 2004, 243 -250.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., BARRAUD S., LIPEME KOUYI G., TORRES A. ET LEPOT M. (2007). Event and annual TSS and C. OD loads in combined sewer overflows estimated by continuous in situ turbidity measurements. <u>In:</u> 11th International Conference on Diffuse Pollution, Belo Horizonte, Brazil, 26-31 August 2007.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., LAPLACE D., JOANNIS C. ET CHEBBO G. (2000). Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Paris: Tech et Lavoisier Doc, 794 p.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J-L ET BARDIN J-P. (2001). Estimation des incertitudes de mesure sur les débits et les charges polluantes en réseau d'assainissement : application au cas d'un basin de retenue-décantation en réseau séparatif pluvial. La Houille Blanche, n° 6/7, pp. 99-108.
- BOUWER H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, vol. 10, pp. 121-142.
- BOUWER H. (1969). Theory of seepage from open channels. Advances in hydrosciences, vol. 5, pp. 121-172.
- DECHESNE M. (2002). Mesure et modélisation des flux d'eau et de polluants dans les systèmes d'infiltration. Thèse Génie Civil. INSA de Lyon, 278 p.
- DUNCAN H. P. Urban stormwater quality: a statistical review. Report 99/3, Melbourne, Australia: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1999.

Disponible sur < http://www.catchment.crc.org.au/archive/pubs/prog12.html> (consulté le 16.01.08).

- FLETCHER T. D. ET DELETIC A. (2007). Statistical evaluation and optimisation of stormwater quality monitoring programmes. Water Science and Technology, vol. 56, n^o 12, pp. 1–9.
- FLINT K. ET DAVIS A. (2007). Pollutant mass flushing- Characterization of highway stormwater runoff from an ultra-urban area. Journal of Environmental Engineering, vol. 133, nº 6, pp. 616-626.
- GAUTIER A., BARRAUD S. ET BARDIN J.P. (1999). An approach to the characterisation and modelling of clogging in stormwater infiltration facilities. <u>In:</u> 8th International Conference on Urban Drainage, Sydney, Australia.
- GÖBEL P., DIERKES C. ET COLDEWEY W.G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. Journal of Contaminant Hydrology, vol. 91, pp. 26–42.
- GONZALEZ-MERCHAN. (2008). Iluants apportés par les bassins versants urbains. Master recherche Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain. Réalisé au Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale, 61 p.

- KAYHANIAN M., SINGH A., SUVERKROPP C. ET BORROUM S. (2003). Impact of Annual Average Daily Traffic on Highway Runoff Pollutant Concentrations. Journal of Environmental Engineering, vol. 129, n^o 11, pp. 975-990.
- LECOUSMER S. (2008). Colmatage et retention des elements traces metalliques dans les systèmes d'infiltration des eaux pluviales. Thèse INSA de Lyon / Monash University of Melbourne. 426 p. (en préparation).
- LINDSEY G., ROBERTS L. AND PAGE W. (1992). Inspection and maintenance of infiltration facilities, Journal of Soil and Water Construction. 47 (6) 481-486.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). (1994). Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. Technical Note 1297, United States Department of Commerce Technology Administration.
- 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 RGCU financé par le Ministère de la Recherche, novembre 2005, 250 p.
- TORRES A., LIPEME KOUYI G., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., PAQUIER A., BARDIN J.-P., S. BARRAUD (2007). Rapport sur la caractérisation du comportement des polluants dans un bassin de retenue-décantation et caractérisation des apports alimentant les ouvrages d'infiltration et calage de modèles de fonctionnement Délivrable D-A1, programme Ecopluies, 58 p.