

Hétérogénéité spatiale et variabilité événementielle des vitesses de chute des sédiments décantés dans un bassin de retenue d'eau pluviale

Spatial heterogeneity and inter-event variability of sediment settling distributions in a stormwater retention tank

A. Torres ¹, M. Hasler ², J.-L. Bertrand-Krajewski ³

LGCIE Hydrologie Urbaine, INSA de Lyon, 34 avenue des Arts, 69621 Villeurbanne cedex, France. (Email : 1) andres.torres@insa-lyon.fr; 2) m.hasler@gmx.at , 3) jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr)

RESUME

Le bassin de retenue-décantation des eaux pluviales Django Reinhardt à Chassieu (France) fait l'objet d'un suivi expérimental, en vue de mieux comprendre et modéliser les phénomènes de décantation dans les ouvrages réels de grande taille. Douze pièges à sédiments répartis sur le radier de l'ouvrage permettent d'obtenir des échantillons des solides décantés au cours des événements pluvieux. Les échantillons collectés sont ensuite analysés en laboratoire, en vue de déterminer leurs courbes de vitesses de chute au moyen du protocole VICAS (Vitesse de Chute en ASSainissement). Les 3 premières campagnes de mesure montrent (i) une grande hétérogénéité spatiale des vitesses de chute pendant chaque événement pluvieux et (ii) une variabilité importante d'un événement pluvieux à l'autre. Les incertitudes relatives maximales sur les vitesses de chute sont de quelques pourcents. Les concentrations en métaux augmentent avec les vitesses de chute.

ABSTRACT

The Django Reinhardt sedimentation basin (in Chassieu, France) provided the basis for an experimental monitoring campaign to better understand and model sedimentation behaviour in full-scale sedimentation systems. Twelve sediment traps placed at the base of the sediment basin permitted solids settled during storm events to be sampled for both settling velocity (according to the French VICAS laboratory-analysis protocol) and heavy metal concentrations. The first three monitoring campaigns demonstrated significant spatial variability in the sediment settling velocity, within a given storm event. Temporal variability between events was also found to be substantial. Uncertainties in the estimated setting velocities were found to be insignificant (typically less than 7%). Importantly, the concentration of heavy metals was observed to increase with increasing sediment settling velocity.

MOTS CLES

Bassin de retenue, incertitude, répartition spatiale, sédiments, vitesse de chute, métaux lourds.

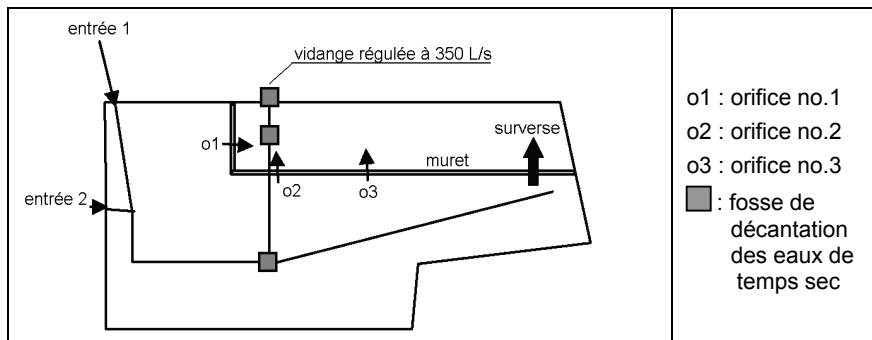
1 INTRODUCTION

Pour mieux concevoir, dimensionner, modéliser et gérer les ouvrages de traitement par décantation des rejets urbains de temps de pluie, la connaissance des courbes de vitesses de chute des polluants en phase particulaire est essentielle. Ces courbes représentent la répartition en masse des solides et des polluants en fonction des vitesses de chute. Les valeurs mesurées et publiées par différents auteurs en France et au niveau international varient selon les événements pluvieux échantillonnés, les sites expérimentaux, les appareils de mesure et les modes opératoires utilisés. Il est donc important de poursuivre les études sur cette question afin d'obtenir une connaissance plus fine et mieux établie des caractéristiques des solides et de leur variabilité.

Dans cette communication, nous présentons les résultats de mesure de vitesses de chute obtenus avec le protocole VICAS (Vitesse de Chute en ASSainissement) (Chebbo *et al.*, 2003 ; Gromaire et Chebbo, 2003) appliqué à des échantillons prélevés dans le bassin de retenue-décantation Django Reinhardt à Chassieu (France), pour différents événements pluvieux. Ce bassin fait partie des sites expérimentaux de l'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine). Deux aspects principaux sont présentés dans cet article : i) l'hétérogénéité spatiale des vitesses de chute sur le radier de l'ouvrage, et la variabilité des résultats en fonction des événements pluvieux, ii) l'évaluation des incertitudes sur les courbes de vitesses de chute mesurées.

2 SITE EXPERIMENTAL, MATERIELS ET METHODES

Le bassin de retenue-infiltration Django Reinhardt a été construit en 1975 pour recueillir les eaux pluviales de la zone industrielle de Chassieu (185 ha). Il a été réaménagé en 1985, en 2002 et en 2004. Il est composé de deux sous-bassins reliés par une canalisation de 60 cm de diamètre : un sous-bassin de retenue-décantation, dans lequel les effluents arrivent en premier, et un sous-bassin d'infiltration. Quelques industries sont autorisées à rejeter des eaux de refroidissement de process dans le réseau d'eaux pluviales. Par temps sec, il existe donc un faible débit permanent arrivant dans le bassin. Le radier du sous-bassin de retenue-décantation est revêtu d'une couche de bitume assurant l'étanchéité et possède une cunette d'environ 2 m de largeur et 20 cm de profondeur permettant l'écoulement des débits de temps sec.



Les parois du bassin sont des talus naturels inclinés recouverts d'un film plastique étanche. Le volume du sous-bassin de retenue-décantation est de 32200 m³ et sa surface au sol de 11302 m². Les effluents arrivent dans l'ouvrage par deux collecteurs circulaires de 1.6 m de diamètre (entrée 1 et entrée 2 sur la Figure 1). Pour favoriser

la décantation, un muret a été construit en 2004. La vidange du sous-bassin est effectuée par trois orifices o1, o2 et o3 à travers le muret. Si le niveau d'eau dans le sous-bassin est supérieur à la hauteur du muret, la vidange a lieu également par surverse. Le débit de vidange vers le sous-bassin d'infiltration est régulé à 350 L/s (Bardin et Barraud, 2004).

La collecte d'échantillons des solides décantés est effectuée au moyen de pièges à sédiments placés au fond du bassin. A partir de résultats préliminaires de modélisation hydraulique, nous avons déterminé les emplacements de 12 pièges en fonction des zones de recirculation, des vitesses d'écoulement et de l'accumulation antérieure des sédiments observée dans le bassin. Les pièges sont numérotés en fonction de leur altitude NGF (les numéros augmentent avec les altitudes) sur la surface du bassin (Figure 2). Les échantillons (eau et sédiments) collectés sont transportés le plus rapidement possible au laboratoire afin de déterminer leurs courbes de vitesses de chute au moyen du protocole VICAS.

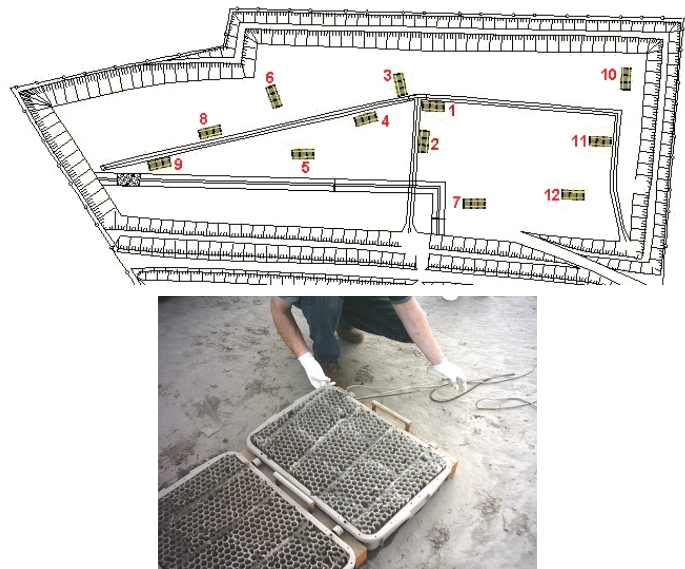


Figure 2 : Emplacements des 12 pièges à sédiments et collecte des échantillons

Le protocole VICAS (Gromaire et Chebbo, 2003) est fondé sur le principe de la suspension homogène, sous l'hypothèse que les particules décantent de manière indépendante les unes des autres, sans former d'agrégats et sans diffusion. Le mesurage est effectué en laboratoire dans une colonne de sédimentation, en eau calme avec une hauteur H . Les solides ayant décanté à différents temps t prédéfinis sont récupérés en bas de la colonne de sédimentation, séchés puis pesés. Ceci permet de déterminer l'évolution de la masse cumulée des solides décantés en fonction du temps $M(t)$. L'objectif du mesurage est de déterminer la courbe $F(V_s)$ indiquant la fraction cumulée F de la masse totale de particules ayant une vitesse de chute inférieure ou égale à V_s , à partir de l'Eq. 1 :

$$F(V_s) = 100 \left(1 - \frac{S(t)}{M_{dec} + M_{fin}} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

avec $S(t) = M(t) - t \frac{dM(t)}{dt}$, $V_s = \frac{H}{t}$, M_{dec} la masse totale décantée et M_{fin} la masse résiduelle dans la colonne à la fin du mesurage. Bertrand-Krajewski (2001) a proposé de représenter la courbe $M(t)$ par une fonction à trois paramètres b , c et d selon l'Eq. 2 :

$$M(t) = \frac{b}{1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d} \quad \text{Eq. 2}$$

La grandeur $F(V_s)$ est donc déterminée à partir des six grandeurs t , b , c , d , M_{dec} et M_{fin} par la relation fonctionnelle :

$$F(V_s) = f_F(t, b, c, d, M_{dec}, M_{fin}) = 1 - \frac{b \left(1 + (1-d) \left(\frac{c}{t}\right)^d \right)}{\left(1 + \left(\frac{c}{t}\right)^d \right)^2 (M_{dec} + M_{fin})} \quad \text{Eq. 3}$$

L'incertitude type de $F(V_s)$ peut être calculée à partir de la loi de propagation des incertitudes :

$$u^2(F(V_s)) = \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\partial f_F}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^6 \frac{\partial f_F}{\partial x_i} \frac{\partial f_F}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad \text{Eq. 4}$$

Avec $u(x_i)$ l'incertitude type estimée de la variable x_i ; $u(x_i, x_j)$ la covariance estimée entre x_i et x_j , et avec $x_1=b$; $x_2=c$; $x_3=d$; $x_4=t$; $x_5=M_{dec}$; $x_6=M_{fin}$. Toutes les dérivées partielles sont évaluables de manière analytique. Pour évaluer l'incertitude type $u(F(V_s))$ il est nécessaire de connaître les grandeurs t , b , c , d , M_{dec} et M_{fin} , et leurs incertitudes respectives. Les incertitudes des grandeurs t , M_{dec} et M_{fin} sont évaluables à partir de mesurages répétés. Par contre, les incertitudes des paramètres b , c et d ne sont pas évaluables directement. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé la méthode de Monte-Carlo dans un code de calcul développé sous MatLab et appelé UVICAS.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

Nous avons réalisé jusqu'à présent (novembre 2006) trois campagnes de mesure notées C1, C2 et C3. Chaque campagne de mesure comprend les douze pièges à sédiments (P1 à P12) indiqués Figure 2 pour chaque événement pluvieux. Le but de chaque campagne est d'obtenir une courbe de distribution des vitesses de chute pour chaque point de mesure. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 3. On observe une variabilité assez importante des courbes obtenues, avec des vitesses médianes (V_{50}) de 0.9 m/h (C2, piège 2) à 17.0 m/h (C3, piège 4). Pour un même événement pluvieux, les courbes de vitesses de chute sont très variables d'un piège à un autre. Pour un piège donné, les courbes varient avec les événements pluvieux.

Nous avons comparé pour chaque piège les courbes de vitesse de chute obtenues pour chaque campagne de mesure. Afin de synthétiser les résultats de cette comparaison, les graphiques de la Figure 4 montrent les valeurs des vitesses médianes V_{50} pour chaque piège pour les trois campagnes (Figure 4, haut), ainsi que le coefficient de variation CV (rapport écart-type / moyenne des trois campagnes) en fonction de V_{50} (Figure 4, bas).

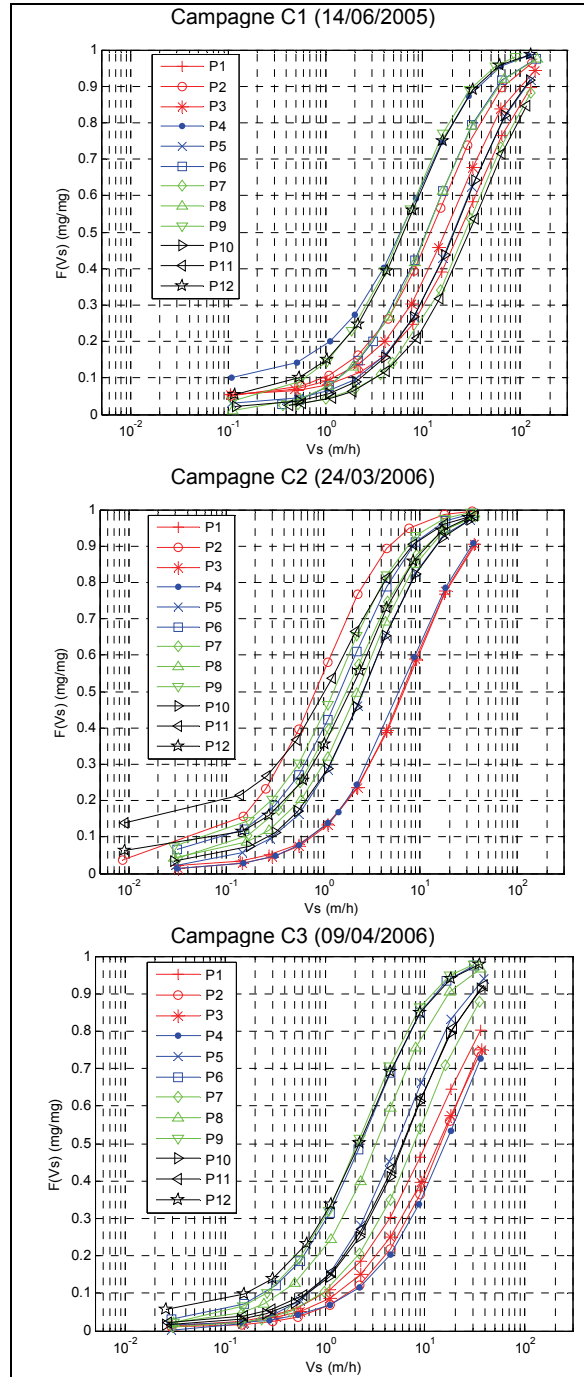


Figure 3 : Courbes des vitesses de chute pour les trois campagnes de mesure

D'après la Figure 4 on observe que C3 présente les plus grandes valeurs de vitesses de chute. En général, ce sont les pièges 1 à 4 qui présentent les vitesses de chute les plus importantes, suivis des pièges 5, 7, 10 et 11. Les pièges 6, 8, 9 et 12 présentent les vitesses de chute les plus faibles. Par ailleurs, le coefficient de variation a tendance à augmenter avec la moyenne des vitesses.

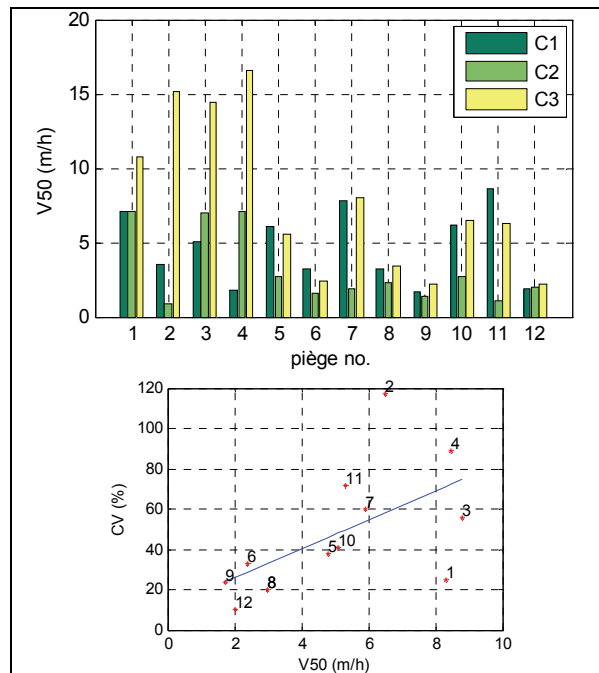


Figure 4 : Comparaison des vitesses médianes V_{50} pour les trois campagnes de mesure. Quelques-unes des caractéristiques globales des événements pluvieux sont indiquées dans le Tableau 1 (gauche). Leur matrice de corrélation avec la vitesse médiane V_{50} est présentée dans le Tableau 1 (droite).

grandeur	C1	C2	C3
Q_{max} (m ³ /s)	0.85	0.60	0.85
V_{tot} (m ³)	11804	10490	32761
DTS (heure)	3	32	95
DP (heure)	24	20	37
TU_{max} (NTU)	1174	106	216

V_{50}					
0.83	Q_{max}				
0.92	0.54	V_{tot}			
0.72	0.21	0.93	DTS		
0.97	0.68	0.98	0.86	DP	
0.03	0.58	-0.37	-0.68	-0.20	TU_{max}

Q_{max} : débit maximum à l'entrée de l'ouvrage pendant l'événement pluvieux, V_{tot} : volume total ruisselé,

DTS : durée de temps avant l'événement pluvieux, DP : durée du ruissellement,

TU_{max} : turbidité maximum à l'entrée de l'ouvrage pendant l'événement pluvieux

Tableau 1 : Caractéristiques globales des trois événements pluvieux étudiés (à gauche) et matrice de corrélation (r) avec les vitesses de chute médianes V_{50} (à droite)

D'après le Tableau 1 (droite), les caractéristiques globales qui ont la plus forte corrélation avec la vitesse médiane V_{50} sont la durée du ruissellement DP et le volume total ruisselé V_{tot} , deux grandeurs caractérisant l'importance hydrologique des événements pluvieux et qui sont elles-mêmes fortement corrélées entre elles. Sur la base de ces premiers résultats partiels, la variabilité des courbes de vitesses de chute pourrait être expliquée par la variabilité des événements pluvieux

correspondants. Des investigations plus approfondies seront menées ultérieurement, avec des données plus nombreuses, pour tenter d'identifier des tendances et des facteurs explicatifs qui pourraient vraisemblablement être liés non seulement aux caractéristiques des événements pluvieux, mais aussi aux conditions hydrodynamiques qu'ils créent dans l'ouvrage (débits, champs de vitesse, etc.).

Nous avons utilisé le programme UVICAS pour évaluer les incertitudes de mesure liées aux courbes de vitesse de chute présentées Figure 3. A titre d'exemple, la Figure 5 montre une synthèse des résultats fournis par le programme UVICAS pour l'indicateur V_{50} . Les incertitudes relatives sont assez faibles, ne dépassant pas 7 % pour V_{20} , 3.5 % pour V_{50} et 1.2 % pour V_{80} . Pour C1, les incertitudes relatives sont assez stables et faibles : aux alentours de 0.4 % pour V_{20} , de 0.3 % pour V_{50} et de 0.2 % pour V_{80} . Pour C2, les incertitudes relatives sont en général plus élevées et plus variables que pour les deux autres campagnes, allant de 0.3 % à 6.2 % pour V_{20} , de 0.3 % à 3.4 % pour V_{50} et de 0.1 % à 1.1 % pour V_{80} . Par ailleurs, les pièges situés aux altitudes les plus élevées (donc submergés moins longtemps au cours des événements pluvieux) présentent des incertitudes relatives plus importantes et *vice versa*. Quant C3, elle présente une situation intermédiaire entre les deux campagnes précédentes, avec des incertitudes relatives comprises entre 0.3 % et 3.2 % pour V_{20} , entre 0.3 % et 1.4 % pour V_{50} , et entre 0.2 % et 0.7 % pour V_{80} . Pour V_{20} et V_{50} , on observe que les incertitudes relatives augmentent avec l'altitude du piège.

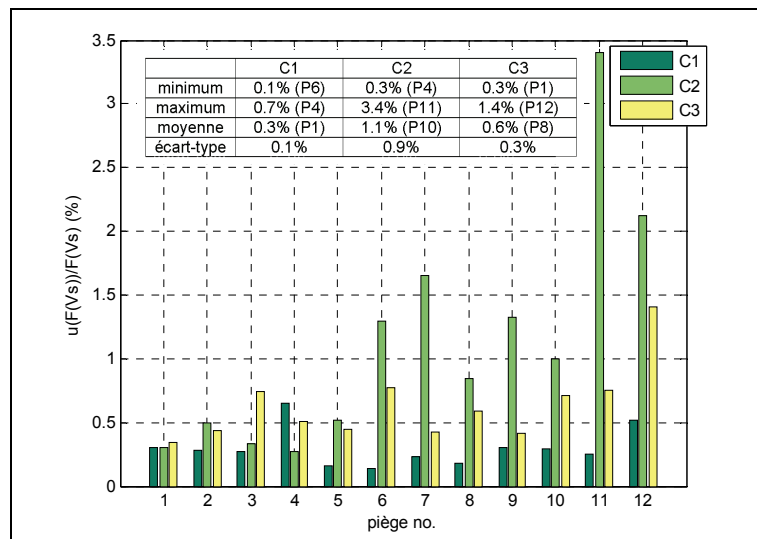


Figure 5 : Incertitudes relatives calculées avec UVICAS pour les vitesses médianes V_{50}

V_{50}				
0.77	Cd			
0.70	0.79	Cu		
0.82	0.95	0.83	Pb	
0.71	0.84	0.99	0.86	Zn

Tableau 2 : Matrice de corrélation (r) entre V_{50} et les teneurs en métaux lourds pour les sédiments relatifs à la campagne C3

En complément des courbes de vitesses de chute, nous avons mesuré les concentrations de 4 métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Zn) sur les sédiments relatifs à la campagne C3. Le Tableau 2 montre la corrélation de ces différentes grandeurs avec la vitesse de chute médiane V_{50} . Les résultats suggèrent qu'il y a une corrélation positive assez importante entre la vitesse de décantation et la pollution métallique.

Par ailleurs, le plomb apparaît comme le paramètre le plus corrélé avec la vitesse médiane V_{50} . Ces tendances seront vérifiées par des campagnes ultérieures.

4 CONCLUSIONS

Trois campagnes de mesure ont été menées sur le bassin de retenue-décantation Django Reinhardt à Chassieu (France) pour déterminer les courbes de vitesses de chute des sédiments en fond d'ouvrage. Les résultats montrent une variabilité importante de ces courbes pour un même emplacement lors de différents événements pluvieux. Une analyse succincte suggère que ces différences pourraient être liées aux caractéristiques différentes des événements pluvieux étudiés, notamment en ce qui concerne la durée de l'événement et le volume total ruisselé. La variabilité des conditions hydrodynamiques au sein du bassin durant la décantation pour différents événements pluvieux pourrait constituer également une origine possible de la variabilité des courbes de vitesses de chute observées. Ces hypothèses ne pourront être testées que lorsque davantage de données auront été collectées lors des prochaines campagnes de mesure, en lien avec des modèles hydrodynamiques 2D et 3D en cours de calage.

Nous avons développé et utilisé le programme UVICAS pour calculer les incertitudes de mesure des courbes de vitesse de chute obtenues avec le protocole VICAS. Les résultats obtenus lors de l'application de ce programme sur les données de vitesse de chute des trois campagnes de mesure indiquent que le protocole présente des incertitudes relatives assez faibles n'excédant pas 7 %. Cependant, nous avons remarqué des différences importantes entre les résultats des calculs d'incertitude pour les trois campagnes de mesure. A nouveau, les campagnes de mesure ultérieures seront indispensables pour envisager des facteurs explicatifs éventuels de ces différences.

Il existe une très grande hétérogénéité des vitesses de chute des solides décantés. Ceci rend difficile la prédiction des vitesses de chute à des endroits non observés, et donc les calculs de bilans de masse et d'efficacité globale de l'ouvrage. Des campagnes de mesure ultérieures contribueront également aux tests de méthodes géostatistiques comme le krigeage ou le cokrigeage, indispensables pour estimer les masses totales de sédiments et de polluants décantés sur la surface de 1 ha du bassin au cours des événements pluvieux. Enfin, une phase ultérieure du programme de recherche consistera à confronter l'ensemble de ces résultats expérimentaux avec des résultats de modélisation hydrodynamique du fonctionnement du bassin durant les événements pluvieux.

Remerciements : Ce travail a été réalisé avec le financement du programme AIfsan, programme de bourses de haut niveau pour l'Amérique Latine, bourse n° E04D034837CO

BIBLIOGRAPHIE

- Bardin J.-P., Barraud S. (2004). *Aide au diagnostic et à la restructuration du bassin de rétention de Chassieu*. Villeurbanne (France) : INSA de Lyon - Laboratoire URGC Hydrologie Urbaine, rapport pour le compte de la Direction de l'Eau du Grand Lyon, juin 2004, 62 p. (non publié).
- Bertrand-Krajewski J.-L. (2001). *Détermination des vitesses de chute des polluants en phase particulaire des rejets urbains par ajustement numérique de la courbe $M(t)$ pour le protocole VICTOR*. Villeurbanne (France) : INSA de Lyon - Laboratoire URGC Hydrologie Urbaine, rapport de recherche, mars 2001, 63 p.
- Chebbou G., Bertrand-Krajewski J.-L., Gromaire M.-C., Aires N. (2003). Répartition des polluants des eaux urbaines par classes de vitesses de chute. Partie A : description des protocoles de mesure. *TSM*, 12, 50-58.
- Gromaire M.-C., Chebbou G. (2003). *Mesure de la vitesse de chute des particules en suspension dans les effluents urbains, protocole VICAS, manuel de l'utilisateur*. Marne-la-Vallée (France) : CERREVE, novembre 2003, 70 p.