

# Ouvrages 8

La gestion des eaux urbaines (eaux usées et eaux pluviales) est réalisée à travers des infrastructures destinées à l'interception ou à la collecte, au stockage, au transfert à surface libre ou à l'infiltration dans les sols urbains des flux d'eau et de polluants.

Ces infrastructures sont dites soit centralisées (installées en réseau d'assainissement séparatif ou unitaire) soit décentralisées (ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source). Leur bon fonctionnement hydrologique et en matière d'abattement des polluants est intimement lié à leur conception.

Les observations, sur le long terme, menées dans le cadre de l'OTHU ont permis de mieux appréhender les processus gouvernant leur fonctionnement et de formuler des recommandations sur leur conception et sur la gestion des sédiments.

Dans ce chapitre, les fonctions des ouvrages stratégiques centralisés et décentralisés de gestion des eaux urbaines sont rappelées. Leur fonctionnement y est décrit. Les règles de conception associées ainsi que les modalités de gestion des sédiments présents au sein de certains ouvrages (notamment les bassins de retenue-décantation) y sont également explicitées.

# Le déversoir d'orage : l'allié des réseaux d'assainissement, l'adversaire des milieux ?

Gislain Lipeme Kouyi, INSA Lyon

**Installés en réseau unitaire, les déversoirs d'orage permettent de protéger les ouvrages aval et les stations d'épuration contre les surcharges occasionnées par certains événements pluvieux. Mais ces ouvrages sont aussi pointés du doigt en raison de leurs déversements polluants, qui contribuent à la dégradation des milieux aquatiques.**

## Qu'est-ce qu'un déversoir d'orage ?

Un déversoir d'orage (DO) est un ouvrage de dérivation qui permet d'orienter un écoulement amont vers au moins deux destinations aval. Installé en réseau unitaire, il protège le réseau aval contre des surcharges hydrauliques importantes en temps de pluie. Son rôle principal est d'écrêter le surplus de volume qui ne peut être accueilli à la station de traitement. Lors d'un épisode pluvieux intense, il arrive que les DO rejettent des eaux non traitées dans le milieu aquatique. Ces déversements contribuent à la dégradation des milieux (rejets de micropolluants – Weyrauch *et al.*, 2010, rejet de microorganismes dont des pathogènes – Passerat *et al.*, 2011). Ils n'ont pas été initialement conçus pour être instrumentés et leurs géométries ne sont pas standardisées. Comme indiqué sur la figure 1, il s'agit d'ouvrages composés d'une ou plusieurs conduites amont et d'une chambre de dérivation qui permet d'orienter une partie du débit amont vers le milieu naturel (débit déversé) et une autre partie vers la station de traitement (débit conservé).

Leur gestion est primordiale si l'on souhaite contrôler leurs rejets et prendre des mesures appropriées pour protéger les milieux aquatiques récepteurs. Ces mesures comprennent par exemple l'installation d'équipements de récupération des macro déchets, l'installation de bassins d'orage ou encore de filtres plantés de roseaux comme proposé dans le cadre du projet ANR SEGTEUP (système extensif pour la gestion et le

traitement des eaux urbaines de temps de pluie – en appui sur l'OTHU). Cependant, leur gestion passe par une maîtrise de leur fonctionnement hydraulique (figure 2), mais aussi et surtout, de leurs rejets polluants.

## Le fonctionnement et le rôle d'un DO

Le fonctionnement hydraulique d'un DO dépend de sa typologie et des conditions aux limites de l'ouvrage, c'est à dire principalement les débits et hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du DO considéré.

### Les catégories de DO

La typologie des DO est difficile à faire. Si on se base sur la géométrie, on peut les classer en deux grandes catégories : i) DO à seuil et ii) DO sans seuil.

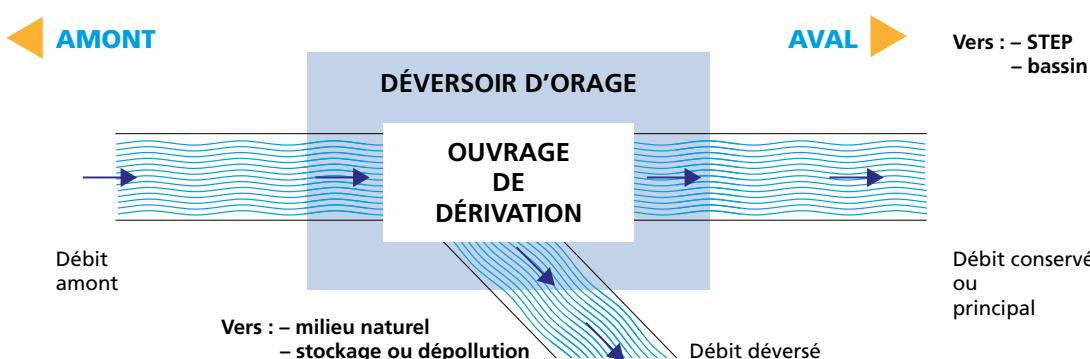
- i) **Les DO à seuil** comprennent ceux à seuils latéraux ou frontaux. Ces seuils peuvent être « hauts » ou « bas », selon que la hauteur du seuil ou de la pelle est supérieure ou inférieure à la côte de la génératrice supérieure de la conduite aval véhiculant le débit conservé vers la station de traitement.
- ii) **Les DO sans seuil** correspondent par exemple aux diffusions : l'écoulement amont est séparé en au moins deux écoulements aval véhiculés par deux conduites différentes, une conduite transportant le débit conservé et l'autre le débit déversé. Ils correspondent également aux DO ayant une ouverture : latérale, frontale ou au niveau du radier (fond de l'ouvrage). Les DO avec une ouverture au niveau du radier sont appelés *leaping weir*.

### L'analyse du fonctionnement d'un DO

Le fonctionnement peut être analysé :

- ▶ en mettant en place des instruments de mesure : surveillance des hauteurs d'eau, des débits, des concentrations en polluants (par exemple suivi des matières en suspension ou de la demande biochimique en oxygène à 5 jours – DBO5) ;
- ▶ à l'aide de caméras : collecte de vidéos puis exploitation

Figure 1 : Schéma de principe d'un déversoir d'orage (STEP = station d'épuration ou station de traitement des eaux unitaires).



de ces dernières pour visualiser puis interpréter les écoulements;

- ▶ par modélisation.

Le plus souvent, ces ouvrages fonctionnent en régime fluvial, torrentiel, ou une combinaison des deux faisant apparaître un ressaut hydraulique (élévation brusque de la hauteur d'eau dans le sens de l'écoulement lorsqu'il passe d'un régime torrentiel à un régime fluvial). Pour savoir si un écoulement est fluvial ou torrentiel, il faut calculer le nombre de Froude. Le nombre de Froude est un nombre adimensionnel qui compare les forces d'inertie aux forces gravitationnelles. Il est donné par la formule:

$$\frac{U}{\sqrt{gD_h}}$$
 où  $U$  est la vitesse moyenne de l'écoulement,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $D_h$  le diamètre hydraulique de l'écoulement, qui s'obtient en divisant la section mouillée de l'écoulement par la largeur de la surface libre (largeur au miroir) associée. Si le nombre de Froude est inférieur à 1, on parle de régime fluvial, et s'il est supérieur à 1 on parle de régime torrentiel.

### Les fonctions d'un DO

Quelle que soit sa géométrie et son mode de fonctionnement, un DO doit assurer trois fonctions principales :

- ▶ par temps sec, laisser transiter le débit des eaux usées sans déversement et sans faire trop chuter la vitesse de l'écoulement afin de limiter la décantation des matières en suspension présentes dans l'effluent;
- ▶ par temps de pluie, laisser transiter le débit de référence, c'est à dire le débit maximal admis à l'aval, sans déversement;
- ▶ enfin, déverser le débit excédentaire de temps de pluie (au-delà du débit de référence) pour soulager le réseau à l'aval, sans mise en charge et sans provoquer de décantation dans la conduite amont.

### Les masses de polluants rejetées lors des déversements, sont extrêmement variables

Deux déversoirs d'orage sont suivis dans le cadre de l'OTHU : le DO de Grézieu-la-Varenne et celui d'Écully. Concernant le DO d'Écully, la figure 3 illustre la variabilité des masses de MES (matières en suspension) et DCO (demande chimique en oxygène) déversées. Ces masses déversées sont parfois très faibles mais peuvent aussi atteindre plusieurs centaines de kilogrammes lors de certains événements pluvieux. Cet exemple nous montre l'intérêt d'un suivi en continu; en effet,

### Doit-on continuer à installer des déversoirs d'orage ?

Les DO ont un fonctionnement complexe et sont difficiles à équiper. Leurs rejets contribuent à la dégradation des milieux naturels. La gestion des DO existants pose déjà beaucoup de difficultés d'instrumentation et de suivi et on peut donc légitimement se poser la question de la pertinence d'en construire de nouveaux. Pour éviter de construire de nouveaux DO et donc réduire fortement les rejets vers le milieu naturel, on pourrait privilégier la gestion des eaux pluviales à la source. Le projet Conscéquans (financement ZABR/AERMC) permettra en partie de répondre à cette question.

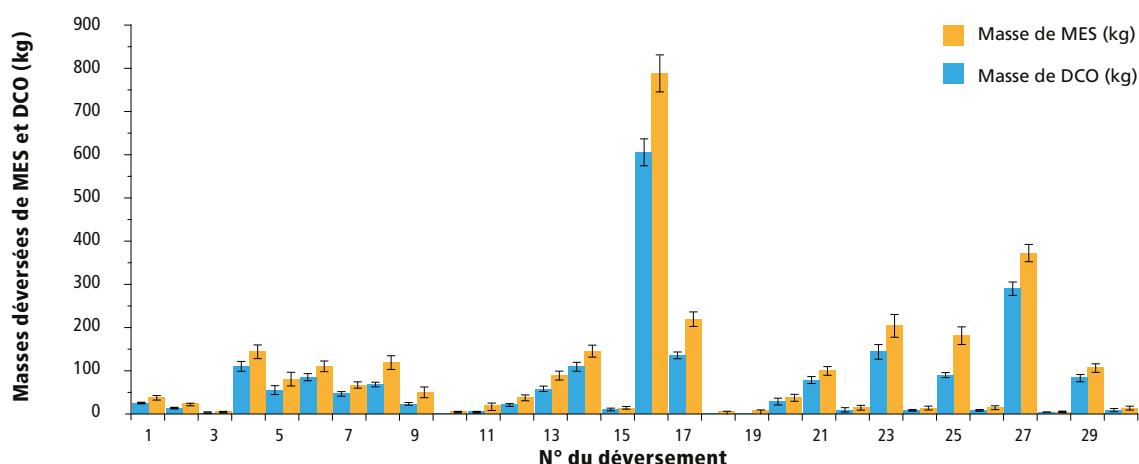
Figure 2 : DO latéral en fonctionnement (ville de Fontainebleau).

Le débit déversé, indiqué par la flèche rouge, est variable le long du seuil de déversement avec un déversement plus important à l'aval du seuil – la flèche verte indique le sens de l'écoulement et symbolise le débit amont.



si l'on échantillonne uniquement quelques événements, par exemple les événements 3, 19 et 28, cela entraîne une très forte sous-estimation des masses de polluants déversées; inversement, si on échantillonne l'événement 16, l'évaluation sera également biaisée car ce cas correspond à un déversement exceptionnel sur la période considérée.

Figure 3 : Masses de MES et DCO pour les 30 déversements mesurés à Écully en 2004 (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2008).



# Intersections dans les réseaux d'assainissement : des structures d'écoulement complexes à comprendre et à gérer ?

Emmanuel Mignot, Nicolas Rivière, Gislain Lipeme Kouyi, INSA de Lyon

**Le recouvrement du bon état écologique des milieux aquatiques ne pourra être atteint sans une optimisation du fonctionnement des systèmes de collecte. Or, les quelque 300 000 km de réseaux d'eaux usées et séparatifs présents sous nos pieds sont loin d'être un long fleuve tranquille : les coudes, chutes, confluences et diffluences entraînent la formation d'écoulements complexes à mesurer et à maîtriser.**

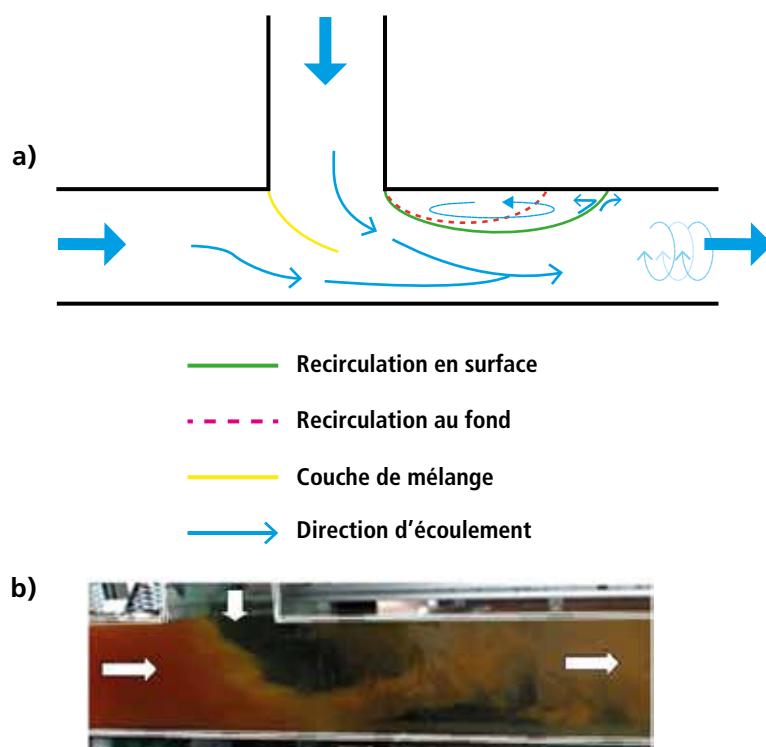
## La problématique des intersections

Les intersections de canalisations sont des ouvrages très fréquemment rencontrés dans les réseaux d'assainissement. On y trouve notamment :

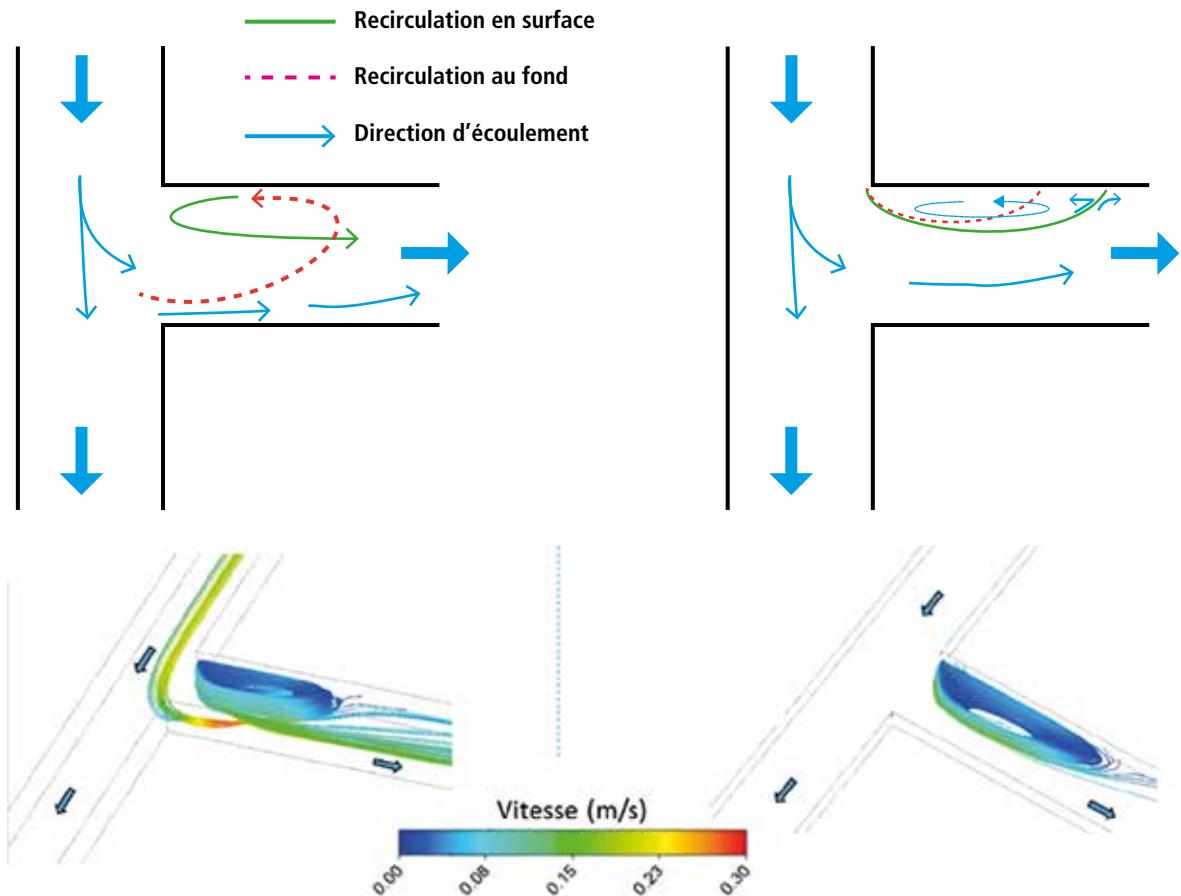
- ▶ des confluences (aussi appelées jonctions) : avec deux écoulements amont qui se rassemblent en un seul en aval (figure 1);
- ▶ des diffluences (ou bifurcations) : avec un écoulement amont qui se sépare en un écoulement aval (souvent dans l'alignement de la branche amont) et un écoulement latéral (figure 2).

Les confluences résultent du fait que les réseaux d'assainissement sont des systèmes de collecte de multiples rejets ponctuels et/ou des eaux de ruissellement pour les acheminer vers la station d'épuration ou tout autre dispositif de traitement en aval. Les eaux se rassemblent alors aux confluences dans des écoulements de plus en plus importants. Les diffluences, quant à elles, sont principalement rencontrées au niveau des déversoirs d'orage en assainissement. Ces deux types d'intersection (confluence et diffluence) entraînent la formation d'écoulements localement tridimensionnels et complexes, avec deux problématiques majeures :

Figure 1 : Schéma (a) et photographie (b) des structures d'écoulement dans les confluences (vues de dessus). (Source INSA Lyon)



**Figure 2 :** Détails des structures d'écoulement dans des diffluences (haut) avec une illustration des lignes de courant au sein des deux formes de zones de recirculation (bas): hélice à gauche et recirculation fermée à droite (d'après Momplot *et al.* 2017).



- ▶ un impact sur la fiabilité des mesurages réalisées en aval des intersections;
- ▶ un impact sur le comportement des polluants particulaires et dissous véhiculés.

### La forme d'écoulement dépend du type d'intersection et des paramètres hydrauliques et géométriques du réseau

Si on rencontre aussi des confluences et des diffluences dans les rivières (et celles-ci font l'objet de nombreuses études) leurs caractéristiques sont différentes en réseau d'assainissement, notamment parce qu'il s'agit d'ouvrages manufacturés:

- ▶ les formes de sections sont souvent très simples: on rencontre fréquemment des sections rectangulaires, trapézoïdales, circulaires ou ovoïdales;
- ▶ les rapports d'aspect largeur sur profondeur sont faibles, de l'ordre de 1 (plutôt 100 en rivière);
- ▶ les angles sont généralement vifs et nets aux intersections.

On pourrait alors imaginer que les écoulements sont également simplifiés; mais il n'en est rien!

Les formes d'écoulement qui ont lieu dans ces intersections

diffèrent fortement entre confluences et diffluences et en fonction des caractéristiques géométriques (typiquement angle de l'intersection) et hydrauliques (débits en jeu). L'aspect hydrodynamique de ces écoulements a été largement étudié en laboratoire, notamment pour des sections de forme simplifiée avec un grand angle d'intersection et des profondeurs d'eau importantes, typiques des réseaux d'assainissement. On trouve notamment les structures d'écoulement complexes suivantes.

#### En confluences

En confluences (figure 1), une zone de recirculation se forme au sein de la branche aval (du côté de la branche latérale), accompagnée d'une zone d'accélération sur la partie restante de la section (Mignot *et al.*, 2012). De plus, si les vitesses des deux écoulements amont diffèrent suffisamment, une couche de mélange est observée à l'interface entre les deux écoulements au sein de l'intersection. Enfin, des écoulements secondaires complexes ont lieu dans la branche aval, qui peuvent persister sur de longues distances; cette recirculation aval peut notamment prendre une forme d'hélice occupant la majeure partie de la section.

#### En diffluences

En diffluences (figure 2), une importante zone de recirculation caractérise la branche latérale, qui peut prendre deux formes différentes en fonction des conditions géométriques et de l'écoulement amont. L'écoulement, fortement tridimensionnel,

est soumis à une force centrifuge plus importante en surface que près du fond. L'écoulement a alors plus de facilité à tourner vers la branche latérale près du fond qu'en surface. Ce processus est responsable de l'*effet Bulle*, c'est-à-dire qu'une quantité relative plus importante de sédiments que d'eau rejoint la branche latérale.

## Les intersections rendent la mesure de débit complexe

D'un point de vue opérationnel, la première problématique liée aux intersections concerne la mesure du débit. Celle-ci est en effet rendue complexe par la présence des écoulements tridimensionnels, notamment car il est délicat de relier la vitesse mesurée localement avec la vitesse moyenne, qui, multipliée par la section de passage, permet d'estimer le débit liquide.

Concernant la mesure du débit en confluence, El Bahlouli *et al.* (2017, figure 3) ont montré qu'en utilisant un capteur Doppler posé au fond, une distance d'environ 10 largeurs à l'aval de la confluence est requise afin d'estimer le débit avec une erreur de l'ordre de 5 %, pour un rapport d'aspect moyen (rapport « largeur/profondeur » compris entre 2 et 4). En revanche, si l'écoulement est peu profond ou très profond (rapport « largeur/profondeur » < 2 ou > 4), cette erreur augmente jusqu'à 15, voire 20 %, même pour des distances beaucoup plus élevées.

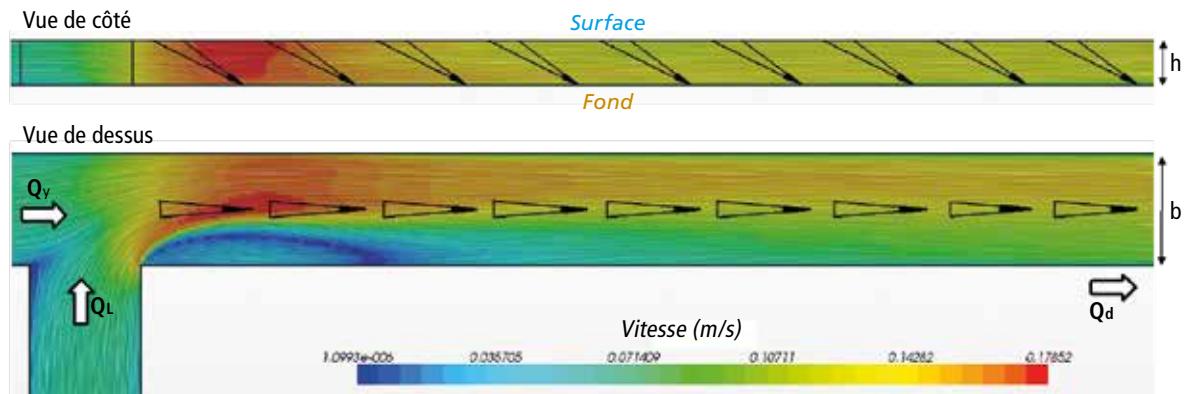
En difffluence, la mesure du débit au sein de la branche latérale est rendue particulièrement délicate par un caractère tridimensionnel très marqué de l'écoulement et la présence de la zone de recirculation. L'estimation de ce débit, notamment au sein des déversoirs d'orage, nécessite l'utilisation d'ouvrages spécifiques, tels que des canaux Venturi ou des dispositifs calibrés du type DSM-flux (voir Question 2.6: *Comment mesurer le débit déversé par un déversoir d'orage ?*).

## Les intersections peuvent causer une accumulation de polluants

Pour ce qui est du transport particulaire, les travaux de laboratoire - dont certains sont menés dans le cadre de l'OTHU - ont confirmé la présence de dépôts spécifiques dans les zones de stockage, pour les difffluences comme pour les confluences. Ces zones de stockage, notamment au sein des zones de recirculation, peuvent être à l'origine d'une accumulation de polluants: polluants flottants en surface, polluants particulaires déposés au fond, ou polluants dissous.

De plus, de nombreux auteurs commencent à s'intéresser à l'efficacité du mélange à l'aval des confluences; ce mélange étant rendu particulièrement complexe par les écoulements secondaires dans la branche aval des confluences et latérale des diffluences (figure 1a).

**Figure 3 :** Champ de vitesse de l'écoulement dans une confluence, avec en noir les volumes de mesure vus par des capteurs Doppler localisés à différentes distances de la confluence (source : El Bahlouli *et al.*, 2017).



## En Bref...

**Les réseaux d'assainissement présentent de nombreuses singularités, parmi lesquelles les intersections de canalisations, qui rendent les écoulements localement fortement tridimensionnels avec de forts gradients de vitesse. Cela engendre des difficultés de mesurage du débit à proximité mais également de potentielles accumulations de polluants dans les zones de recirculation.**

## POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Larrarte F.,** (2019). Rapport final du projet MENTOR selon consignes ANR. [Rapport de recherche] IFSTTAR – Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2016, 11 p. – <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01712018> ainsi que les guides techniques du projet : [lc.cx/mentor2016](http://lc.cx/mentor2016)
- ▶ **Larrarte F., Bardiaux J-B., Bellahcen S., Bonakdari H., Claverie R., et al.**, Projet COACHS – Rapport finalisé. [Rapport de recherche] IFSTTAR – Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2014, 162 p. – <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01578395>
- ▶ **Momplot A., Lipeme Kouyi G., Bertrand-Krajewski J.-L., Mignot E., Rivière N.,** (2013). Modélisation tridimensionnelle des écoulements multiphasiques en régime instationnaire au droit d'ouvrages spéciaux présents en réseau d'assainissement : performances des modèles et analyse de sensibilité. *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, 2013 (4), pp.16-24. – <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00931486/>

# Techniques alternatives... Des alternatives loin de n'être que techniques !

Sylvie Barraud, Hélène Castebrunet, Gislain Lipeme Kouyi, INSA Lyon - Elodie Brelot, GRAIE

**Les techniques alternatives regroupent une multitude de solutions permettant une gestion intégrée et décentralisée des eaux pluviales urbaines. Elles s'appuient sur des solutions d'aménagement favorisant l'infiltration, le stockage temporaire ou encore l'évapotranspiration comme les solutions fondées sur la nature par exemple. On tend de plus en plus à rectifier la terminologie pour parler de solutions de gestion à la source ou solutions décentralisées pour dépasser une vision purement technique qui s'appuierait sur un catalogue de technologies préconçues. L'idée est de gérer l'eau de pluie comme une ressource au service de l'aménagement et non comme un problème technique dont il faudrait se débarrasser.**

## Une diversité de solutions

Les techniques alternatives désignent un ensemble de solutions répondant à une évolution majeure de la stratégie de gestion des eaux pluviales (EP) dans l'aménagement depuis les années 1970: d'une stratégie fondée sur l'évacuation rapide des eaux pluviales drainées par réseaux de conduites, nous sommes passés progressivement à une stratégie de contrôle du ruissellement et de la gestion au plus près de la source.

En France, les premières réponses, notamment dans un contexte d'expansion urbaine et de villes nouvelles, ont été la réalisation de bassins de retenue et d'infiltration, souvent à l'exutoire d'un réseau (photos 1. a et b), (solutions centralisées). Depuis, et, notamment dans un contexte de densification et de reconstruction de la ville sur la ville, les solutions à la source se développent, sous des formes multiples tant en termes de géométrie, que de matériaux, comme les noues, toitures végétalisées, jardins de pluie, chaussées à structure réservoir, fossés, tranchées et puits d'infiltration... (photos 1. c et d).

Le recours à ces modes de gestion est largement partagé à l'international; on les trouve ainsi sous des vocables comme: LIDS (système de développement à faible impact), BMP (pratique de gestion optimisée sous-entendue des EP), SUDS (système de drainage urbain durable), WSUD (conception de la ville sensible à la problématique de l'eau) ou encore NBS (solution fondée sur la nature) (Fletcher *et al.*, 2014).

Le vocable « Techniques alternatives » usité en France n'est pas des plus heureux, et ce pour deux raisons :

- ▶ parce qu'une « technique » a une fonction de service principal, qui serait la gestion des eaux pluviales, alors que, au-delà de la gestion des eaux pluviales, l'importance et la diversité des autres fonctions et services rendus dépassent largement la simple réponse d'un ouvrage technique,
- ▶ parce qu'une solution présentée comme « alternative » (sous-entendu au tout-tuyau) fait toujours référence à ce mode d'évacuation traditionnel qu'il s'agit de dépasser et qui ne constitue pas une référence.

Le terme générique de solution de gestion décentralisée des eaux pluviales semble ainsi mieux couvrir l'ensemble de solutions proposées ici.

## Des fonctions multiples

Les stratégies de gestion des eaux pluviales à la source doivent répondre à plusieurs objectifs :

- ▶ maîtriser les risques d'inondation;
- ▶ préserver l'alimentation naturelle des nappes, des cours d'eau, et donc des ressources en eau;
- ▶ préserver la qualité des milieux naturels et ressources en eau;
- ▶ limiter les coûts de gestion collective des eaux,
- ▶ favoriser/optimiser les aménagements en les rendant plurifonctionnels;
- ▶ rendre les villes plus résilientes face aux changements globaux.

La plurifonctionnalité des solutions de gestion décentralisée des eaux pluviales leur permet de répondre à ces objectifs :

### Les fonctions de service ou fonctions premières

- ▶ éviter le ruissellement, la concentration des flux d'eau et de polluants, et s'adapter aux différents événements climatiques;
- ▶ favoriser la rétention d'eau, l'infiltration, l'évaporation et l'évapotranspiration et, si ruissellement il y a, le ralentir et stocker temporairement l'eau pour contrôler les débits à l'aval;
- ▶ abattre la pollution des eaux pluviales, par des processus de décantation, de filtration, d'adsorption et de dégradation biologique naturelle.

### Les fonctions vis-à-vis du système global

Elles permettent de soulager les systèmes d'assainissement traditionnels, en désimperméabilisant la ville et en déconnectant les eaux pluviales : elles évitent ou limitent les rejets

polluants par temps de pluie et réduisent les perturbations géomorphologiques et biologiques des cours d'eau. Elles évitent aussi une augmentation exponentielle de la taille des ouvrages et des contraintes d'exploitation, donc permettent de réduire les coûts.

### Les fonctions connexes des solutions ou services rendus dans l'aménagement

Loin d'être négligeables, ces fonctions sont de vraies plus-values. Elles peuvent en effet être :

- ▶ support de biodiversité et contribution aux îlots de fraîcheur en milieu urbain;
- ▶ développement d'espaces multi-usages et amélioration de la qualité paysagère (aires de loisir, terrains de sport, parcs urbains...).

**Technique alternative... l'alternative est loin de n'être que technique et devient peu à peu la voie principale pour gérer les eaux de pluie.**

**Photo 1a :** Bassin d'infiltration centralisé non intégré (Bassin Django-Reinhardt, Chassieu).



**Photo 1b :** Bassin d'infiltration centralisé (IUT Villeurbanne).



**Photos 1c et 1d :** Noues d'infiltration reprenant les eaux de pistes cyclables et voies piétonnes (Campus INSA, Villeurbanne).

8.3



c



d



## Qu'a étudié et apporté l'OTHU ?

L'OTHU s'est attelé dès ses débuts à l'évaluation des performances de ces dispositifs de gestion des eaux pluviales en profitant de sa forte interdisciplinarité et du suivi sur le long terme pour en mesurer les impacts. Cependant, les partenaires opérationnels et chercheurs de l'OTHU ont privilégié tout d'abord l'instrumentation et le suivi de dispositifs centralisés de retenue-infiltration car particulièrement développés sur la métropole de Lyon avec des enjeux forts sur leurs possibles effets sur les eaux souterraines. C'est le cas du bassin de Django-Reinhardt (bassin infiltrant sur moins d'un hectare les eaux d'une surface de 185 ha imperméabilisée à plus de 70 %), ainsi que de plus de dix autres bassins de l'Est lyonnais du même type. Le suivi a donné lieu au déploiement d'équipements météorologiques très novateurs et surtout très intégrés (couplant des mesures de différentes natures). Les recherches ont permis d'apporter des éléments de réponses sur :

- ▶ le rôle des dispositifs de prétraitement sur la gestion des flux d'eau, de solides (décantation) et de polluants ;
- ▶ la caractérisation physico-chimique et microbiologique puis la trajectoire des sédiments piégés dans ces dispositifs ou des fonds de bassins d'infiltration, (voir Chapitre 5: *Contaminants*) ;
- ▶ le rôle des dispositifs d'infiltration centralisés sur le piégeage ou non des polluants et l'impact bio-physico-géo-chimique potentiel des infiltrations sur les nappes, (voir Chapitre 6: *Impacts*) ;
- ▶ l'évolution du colmatage sur le long terme ainsi que le rôle de la végétation et d'invertébrés du sol dans cette évolution, (voir Question 7.4: *Quel est le rôle de la végétation dans le colmatage des systèmes d'infiltration ?* et Question 7.5:

*Quel est le rôle de la faune dans le colmatage des systèmes d'infiltration ?*);

- ▶ les tendances d'évolution sur le long terme, notamment des températures des eaux de surfaces ou souterraines, en lien avec l'évolution des températures de l'air ;

- ▶ la définition et l'évaluation d'indicateurs de performances.

Fort de ses connaissances et son expertise, l'OTHU s'est ensuite engagé dans l'instrumentation spécifique des solutions de gestion décentralisée.

Outre les aspects hydrologiques, sur ces ouvrages, la question de la multifonctionnalité a été également abordée du point de vue sociologique (usages) et anthropologique (pratiques des organisations assurant la gestion). La question des freins à l'adoption de ces solutions a également été traitée. L'analyse des perceptions et des modes de représentation de ces dispositifs et de leur fonction de traitement par différentes catégories d'acteurs et d'usagers a été approfondie (voir Chapitre 1: *Stratégie*).

Plus récemment, les recherches ont permis de comparer les systèmes à la source aux systèmes centralisés du point de vue de leur rôle vis-à-vis des micropolluants (métaux, pesticides, HAP, alkylphénols et dérivés et retardateurs de flammes bromés). (voir Question 8.5: *Quelle est l'efficacité des ouvrages alternatifs vis-à-vis des micropolluants ?*).

Aujourd'hui les recherches sur les performances des ouvrages à la source se poursuivent et se prolongent par la mise en place de modélisations des processus au sein des ouvrages (processus internes décrivant le comportement vis-à-vis des flux d'eau et de polluants) ou de modélisation à l'échelle plus large (quartier ou ville par exemple) pour évaluer l'impact de scénarios de gestion décentralisée. Les effets de la végétalisation sur le microclimat de quartiers aménagés avec des solutions décentralisées sont également en cours d'étude.

# Quels sont les facteurs influençant le fonctionnement et la conception d'un ouvrage d'infiltration ?

Gislain Lipeme Kouyi, INSA Lyon – Laurent Lassabatere, ENTP – Sylvie Barraud, INSA Lyon – Nelly Maamir, La métropole de Lyon – Rafael Angulo Jaramillo, ENTP

**Qu'ils soient centralisés (bassins) ou à la source (noues, tranchées d'infiltration, parkings drainants, etc.), les ouvrages d'infiltration doivent permettre d'infiltrer les eaux pluviales tout en retenant au mieux les polluants transportés par ces eaux. La performance de ces ouvrages dépend fortement de certains facteurs liés à leur conception et à leur entretien, qu'il est essentiel de connaître et de maîtriser pour tendre vers un fonctionnement optimal.**

## Filtration et infiltration...

Le fonctionnement d'un ouvrage d'infiltration peut principalement être caractérisé en termes techniques, par deux grandes fonctions : la fonction « infiltration » de l'eau et la fonction « filtration » des polluants. La première vise l'infiltration des eaux pluviales comme mode de drainage d'opérations d'aménagement permettant de se prémunir d'un niveau de risque d'inondation donné. L'infiltration de l'eau permet également de contribuer à recharger la nappe phréatique, si nappe il y a et/ou d'alimenter les couches superficielles de sol et de la végétation s'y trouvant. Les dispositifs doivent être conçus pour éviter la stagnation prolongée des eaux en surface et donc retarder le colmatage. La seconde fonction, qualifiée communément de filtration, même si c'est un abus de langage (voir question 7.2), vise à favoriser la rétention et/ou la dégradation des polluants dans les horizons superficiels du sol de manière à transférer le moins possible les polluants issus du ruissellement.

L'évaluation des performances hydrologiques et d'interception des polluants à court et long termes (incluant les effets du colmatage) a fait l'objet de nombreuses recherches à l'OTRU pour des dispositifs centralisés. On trouvera au chapitre 7 les principaux résultats obtenus sur les différents aspects.

Plus récemment les recherches ont également investigué la question des performances des systèmes d'infiltration à la source (Projet OFB-Micromegas mené en lien avec les projets Matriochka à Nantes et Roulépur à Paris issus des observatoires OPUR et ONEVU). Les résultats sont présentés à la Question 8.5. *Quelle est l'efficacité des ouvrages alternatifs vis-à-vis des micropolluants ?* Il reste encore à ce jour des inconnues concernant le fonctionnement de ces ouvrages à la source sur le long terme et sur l'impact de certains choix de conception et de stratégies d'entretien qui permettraient de développer des méthodologies rigoureuses de gestion patrimoniale.

Malgré tout, ces travaux de recherche ont permis de mettre en lumière un certain nombre de facteurs influençant le fonctionnement des ouvrages, et dont il faut tenir compte lors des phases de conception et d'exploitation.

## Les facteurs impactant le fonctionnement et la conception d'un ouvrage d'infiltration

### Le rapport entre la surface d'infiltration de l'ouvrage et la superficie d'apport des eaux du bassin versant drainé (surface active)

L'idée est que l'on ne doit pas chercher à infiltrer sur des surfaces faibles des quantités d'eau issues de bassins versants drainant des zones de surface importante. Les ouvrages d'infiltration sont en effet des « concentrateurs » de flux d'eau et de polluants, notamment lorsqu'ils sont centralisés. L'effet de concentration est d'autant plus grand que la surface du bassin versant drainé est importante devant la surface d'infiltration.

Ce rapport doit être au moins de l'ordre de quelques pourcents. Il est parfois préférable d'avoir ce ratio élevé, mais cela interroge évidemment la disponibilité de l'espace pour infiltrer dans de bonnes conditions.

### Les caractéristiques des bassins versants

Les activités et la taille du bassin versant drainé conditionnent évidemment les flux et la nature des polluants/contaminants. Pour les polluants chimiques, on ne peut malheureusement pas associer, même qualitativement, un type d'urbanisation à des niveaux approximatifs de pollution. Les concentrations comme les masses sont extrêmement variables d'un événement à l'autre avec une variabilité supérieure à celle d'un site à l'autre.

Cependant, il sera important de prêter attention aux apports possibles de polluants (utilisations de produits phytosanitaires par exemple sur les ouvrages ou aux alentours) ou encore aux apports de fines (chantiers à proximité, types de surfaces érodées...) pour ne pas colmater précocement les surfaces infiltrantes.

### Les propriétés du sol sous l'ouvrage d'infiltration

La conductivité hydraulique (perméabilité) du sol est évidemment un facteur clé. Le sol doit tout d'abord présenter une **conductivité hydraulique (perméabilité)** suffisante. En outre, la **zone non saturée** doit être suffisamment épaisse. Cette zone sert de zone tampon entre la surface du sol et la nappe phréatique et permet l'essentiel de la dégradation et de la rétention des polluants. C'est elle qui

assure principalement la fonction « filtration/rétenzione » des polluants. On s'accorde souvent sur une épaisseur minimale de 1 à 2 m.

La nature du sol doit être également propice à la présence d'eau : Certains sols, superficiels ou non, ont des comportements mécaniques interdisant l'infiltration ou tout du moins la limitant. En matière de stabilité, le risque de dissolution des sols peut être important dans les sols gypseux et interdit toute infiltration ponctuelle et centralisée. De même, le phénomène de retrait-gonflement peut entraîner, dans certains sols, des désordres mécaniques sur les structures environnantes. Ce phénomène n'est pas forcément rédhibitoire car il peut aussi favoriser la stabilité des ouvrages. Chaque sol sera à étudier au cas par cas.

### Les apports et leurs répercussions sur les propriétés du sol

L'apport de matière en suspension par les eaux de ruissellement pluvial est un des facteurs qui conduit à un colmatage progressif de l'ouvrage. Une couche sédimentaire peut se former en surface et ainsi freiner l'infiltration et faciliter la décantation de matière solide en surface. Cette couche de surface induit donc une réduction de l'infiltration et nuit à la fonction « infiltration ». En parallèle, constituée de particules fines, elle favorise l'adsorption de certains polluants et est donc bénéfique pour la fonction « filtration ». Notons que le colmatage peut être également biologique (voir Question 7.3: *Comment un système d'infiltration se colmate-t-il et en combien de temps ?*).

## Recommandations pour les ouvrages d'infiltration

Pour garantir un bon fonctionnement de ces ouvrages, nous recommandons de les installer sur des formations géologiques superficielles perméables. Dans la région lyonnaise, une grande partie repose sur un dépôt fluvioglaciaire très perméable, ce qui permet de remplir cette condition. Il faut s'assurer aussi du maintien dans le temps de la fonction « infiltration » par suivi du colmatage et de son effet négatif sur cette fonction. En parallèle il faut veiller à ce que la capacité d'infiltration ne nuise pas à la capacité de filtration et d'épuration de l'ouvrage de sorte que le risque de pollution de la nappe soit réduit. On admet communément que si on maintient au moins deux mètres de zone non saturée pour le cas d'un ouvrage d'infiltration centralisé, on assure une filtration de la plus grande partie des polluants. Il faut aussi veiller à ce que l'ouvrage d'infiltration centralisé soit éloigné des zones vulnérables en termes de qualité des eaux (puits de captage, etc.). Les ouvrages d'infiltration doivent être exploités en prenant en compte l'évolution du système dans son ensemble, en incluant les effets de la végétation, des changements globaux et des forçages anthropiques.

De plus, la présence d'eau dans le sol et la couche sédimentaire de surface rendent ces lieux propices à la colonisation par les plantes. Or, la **végétation** influence fortement le fonctionnement d'un ouvrage. Le développement du système racinaire permet d'améliorer la fonction « infiltration ». En effet, en se développant dans le sédiment et le sol sous-jacent, les racines créent des macropores, favorisant l'infiltration de l'eau vers les horizons inférieurs. Cet effet positif sur la fonction « infiltration » peut se traduire par un effet négatif potentiel sur la fonction « filtration », avec un risque de migration des polluants en lien avec la création des **chemins d'écoulement préférentiel**. Cependant, globalement les observations menées dans l'OTHU, montrent que la présence de végétation a un effet bénéfique, pour des dispositifs centralisés ou décentralisés, ceci est lié au complexe sol/végétation qui est notamment très efficace pour lutter contre le colmatage et retenir la pollution particulaire (voir Question 7.4: *Quel est le rôle de la végétation face au colmatage des systèmes d'infiltration ?*).

Par ailleurs, l'évolution dans le temps des apports et la continuité écologique débouchent sur la constitution d'un écosystème dynamique propice au développement de la **biodiversité** et fortement dépendant des conditions locales (géologie, climat,...). Ces écosystèmes sont aussi a priori soumis aux **changements globaux** et notamment au réchauffement du climat en cours. Les études menées sur l'OTHU sur de longues chroniques montrent que les effets des variations de températures sont d'autant plus sensibles que les dispositifs sont centralisés avec des zones non saturées faibles. (voir notamment question 6.1: *Quel est l'impact des bassins d'infiltration d'eaux pluviales sur les nappes phréatiques ?*)

### Les ouvrages à la source ont une capacité de filtration et de rétention des micropolluants plus élevée

Divers systèmes de gestion des EP ont été comparés en termes de fonction « infiltration » et « filtration ». Pour cette dernière, nous avons comparé trois systèmes de gestion à la source (parking muni d'une chaussée à structure réservoir et revêtement perméable, d'une tranchée d'infiltration; et d'une noue) à un parking traditionnel imperméable dans le but d'avoir une première idée du niveau de performances en terme d'abattement de micropolluants des systèmes d'infiltration par rapport à un système imperméable. Les constats suivants ont été établis à l'issue de cette étude sont: (voir aussi Question 8.5: *Quelle est l'efficacité des ouvrages alternatifs vis-à-vis des micropolluants ?*):

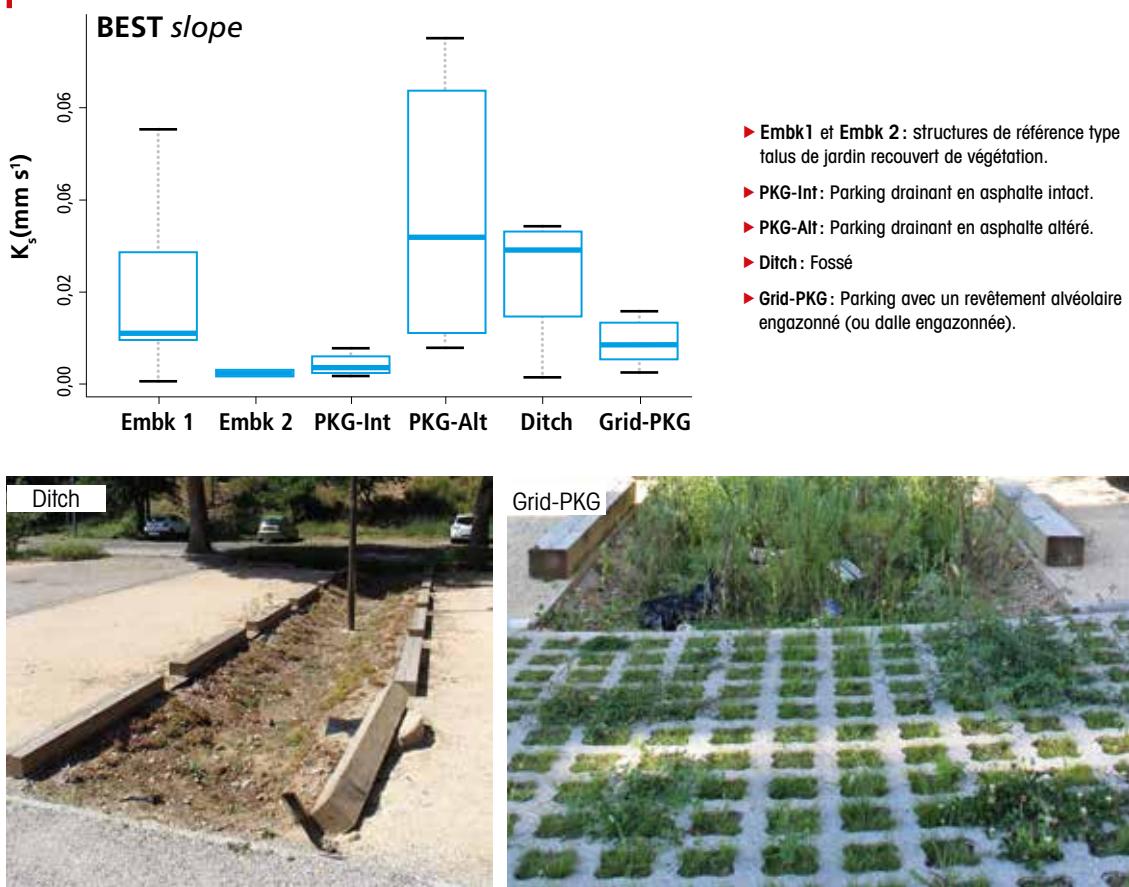
- ▶ un effet significatif sur l'infiltration de l'eau et la réduction des volumes ruisselés à gérer;
- ▶ un abattement très efficace des micropolluants particulaires et même dissous sur ces petits systèmes;
- ▶ une efficacité plus élevée pour les systèmes décentralisés que centralisés;
- ▶ une efficacité des systèmes végétalisés encore plus élevée.

Un dispositif d'infiltration végétalisé avec une terre végétale comme support semble plus efficace. Ces résultats sont à confirmer sur le long terme.

### Le test Beekan pour évaluer la capacité d'infiltration des surfaces drainantes ou de fonds d'ouvrages

De nombreuses solutions font appel à des revêtements de surface drainants (enrobés, bétons drainants, pavés perméables, dalles gazon...) ou infiltrant au travers de surfaces

**Figure 1 :** Estimations de  $K_s$  (conductivité hydraulique à saturation) pour diverses techniques allouées à l'infiltration des eaux pluviales sur l'EcoCampus (Bouarafa *et al.*, 2019).



**Photo 1 :** Bassin d'infiltration végétalisé Minerve sur le site de Portes des Alpes – Métropole de Lyon (source : UCBL Lehna E3S).



de sols naturels ou rapportés dont il est nécessaire de s'assurer périodiquement de la perméabilité.

Le test Beerkan, permet d'évaluer la perméabilité de tels dispositifs. Il consiste à poser un anneau à même le sol et à verser dans l'anneau des volumes successifs d'eau connus (souvent de 100 ou 200 ml). Le temps d'infiltration est alors noté pour tous les volumes d'eau. Le ratio « volume d'eau infiltré » sur « temps d'infiltration » permet de quantifier le flux infiltré et donne une bonne idée de la capacité d'infiltration du revêtement ou de la surface d'infiltration en présence. Cette technique est très simple. Elle peut être facilement déployée à plus large échelle pour comparer les zones d'infiltration entre elles (variabilité spatiale au sein d'un ouvrage ou comparaison entre ouvrages). Elle peut être aussi employée pour suivre l'impact de la couche sédimentaire de surface sur l'infiltration en des points particuliers. La comparaison de données entre une zone témoin non affectée par la couche sédimentaire et une zone colmatée permet de mesurer la réduction de perméabilité. Cette dernière donnée peut ensuite être utilisée pour modéliser le fonctionnement de l'ouvrage (Lassabatere *et al.*, 2010) et/ou intervenir pour une opération de décolmatage.

Par exemple, des essais ont été effectués pour divers revêtements perméables ou surfaces d'ouvrage sur le site Ecocampus de la Doua (figure 1): sur des surfaces de noues, de tranchées, de parkings et plateformes drainants, etc. et sur des surfaces naturelles témoin (surfaces enherbées). Il s'agissait de comparer ces types d'ouvrages en termes de capacités d'infiltration. On s'aperçoit que les parkings drainants garantissent une perméabilité importante au bout d'une dizaine d'années. En revanche, les structures alvéolaires ne présentent pas plus de perméabilité que les revêtements de parkings et sont moins perméables que les surfaces enherbées adjacentes.

Notons que pour des ouvrages centralisés de grandes tailles (quelques milliers de m<sup>2</sup>), une méthode de mesure de colmatage « en grand » a été élaborée par les équipes de l'OTRU et permet d'avoir une idée réaliste de leur état global de colmatage.

## Recommandations pour limiter le colmatage lors de la conception des ouvrages

Le programme ANR Ecopluias a permis d'aboutir à un ensemble de recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain (Barraud *et al.*, 2006). Ainsi, pour limiter le colmatage, il est recommandé lors de la conception des ouvrages:

- ▶ de prendre principalement en compte le colmatage du fond et moins celui des parois;
- ▶ de prendre un rapport de surfaces « S infiltrée/ S active » le plus élevé possible (ne jamais descendre en dessous de 1%);
- ▶ pour des ouvrages centralisés, d'éviter l'apport permanent d'eau de temps sec, qui favorise le développement de biofilm;
- ▶ de protéger le fond des ouvrages par de la végétation dont les racines sont peu denses ou par du matériau granulaire protégeant de la lumière et donc du développement de biofilm;
- ▶ lors de la réhabilitation d'un site, de contrôler toute opération d'enlèvement des sédiments et de terrassement, de manière à ne pas enfouir les couches colmatées et compacter le sol.

# Quelle est l'efficacité des ouvrages alternatifs vis-à-vis des micropolluants ?

Sylvie Barraud et Hélène Castebrunet, INSA Lyon

**Si vous avez été déçus de ne pas pouvoir apprécier des résultats concrets à la Question 2.5 présentant les problématiques de la mesure d'efficacité de dispositifs alternatifs, voici de quoi combler votre frustration et prendre connaissance des tendances observées à partir de ces suivis des micropolluants.**

## Les techniques alternatives réduisent la contamination des rejets

Les solutions alternatives de gestion des eaux pluviales (EP) sont promues car elles visent à diminuer les flux d'eau et à réduire la contamination des rejets vers des milieux aquatiques superficiels et souterrains :

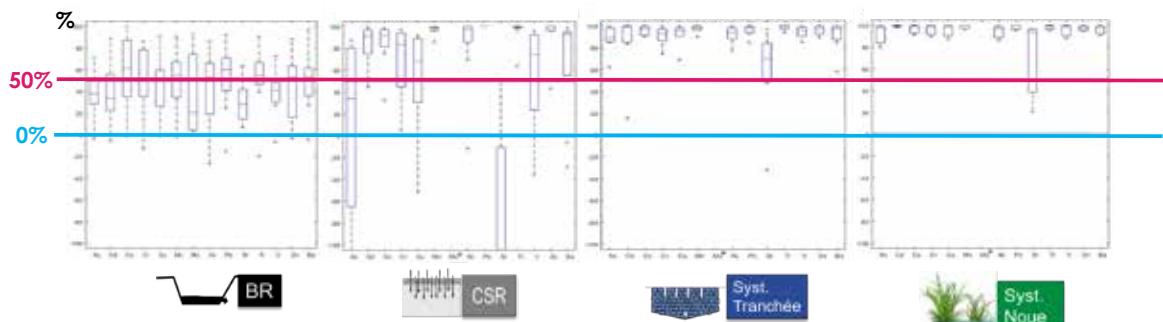
- ▶ soit par décantation : dans le cas des systèmes centralisés de type bassins de retenue-décantation ;
- ▶ soit par limitation des émissions, du lessivage et/ou par piégeage, filtration, décantation : dans le cas des systèmes à la source de type noues, chaussées à structure réservoir (CSR), toitures stockantes, puits, biofiltres, tranchées, etc.

**Figure 1 :** Abattements en masses au mètre carré actif sur l'ensemble des sites et pour les quatre sites et pour les familles de micropolluants.

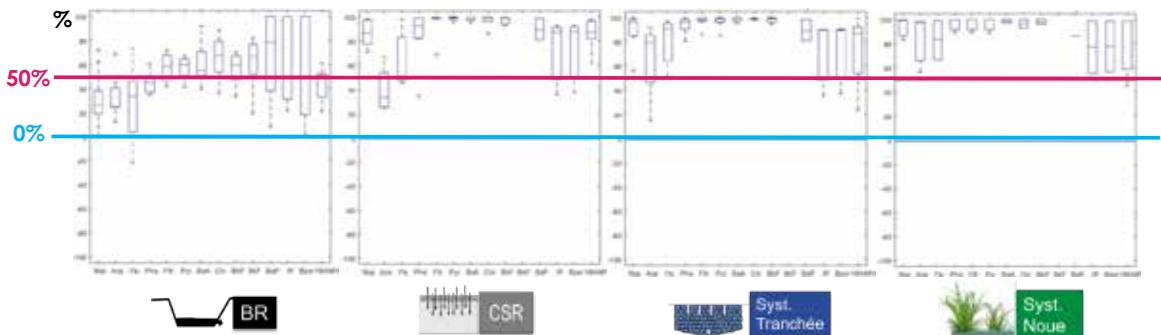
Les abattements sur le bassin de retenue sont évalués entre entrée et sortie (comparaison d'un système traditionnel de conduites vs sortie du bassin de retenue). Les abattements sur les dispositifs à la source sont évalués par rapport à une surface de référence (comparaison d'un parking traditionnel vs parking muni de la nouve végétalisée) (Source : Garnier, 2020)

BR = Bassin de retenue, CSR = Chaussée à structure réservoir, Noue = Parking muni de la nouve végétalisée, Tranchée = Parking muni de la tranchée de graves.

**Abattement en masse/m<sup>2</sup> actif des rejets en Métaux**



**Abattement en masse/m<sup>2</sup> actif des rejets en HAPs**



Liste des HAPs analysés : Nap | Ace | Flu | Phe | Flu | Pyr | BaA | Chr | BbF | BkF | BaP | IP | Bper | 16HAPs

Mais ces ouvrages alternatifs sont-ils réellement efficaces vis-à-vis des micropolluants ?

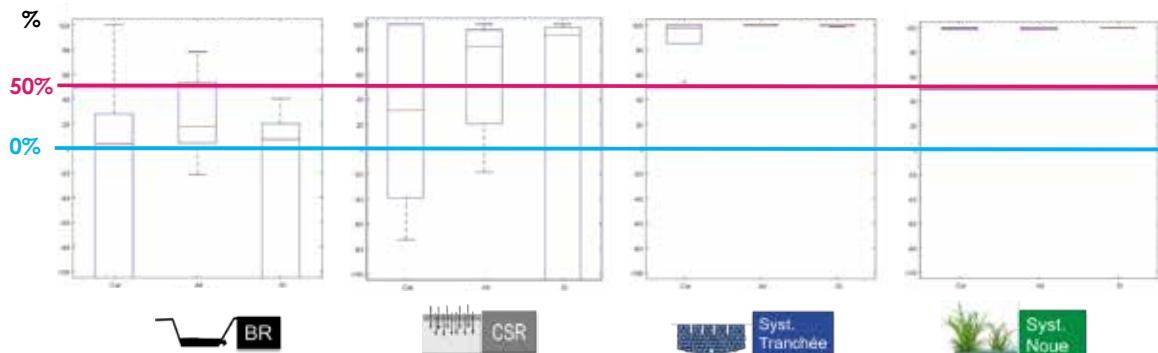
## Le principe d'évaluation : une comparaison des ouvrages alternatifs et traditionnels

L'efficacité des ouvrages alternatifs vis-à-vis des micropolluants est une des questions à laquelle s'est intéressé l'OTHU

depuis 2010. Son évaluation, telle qu'elle a été abordée, concerne le gain ou la perte de performance par rapport à un système traditionnel de gestion des EP. Autrement dit, les chercheurs de l'OTHU ont souhaité savoir si des sites munis d'ouvrages alternatifs déversent davantage ou moins de micropolluants que s'ils n'en étaient pas dotés.

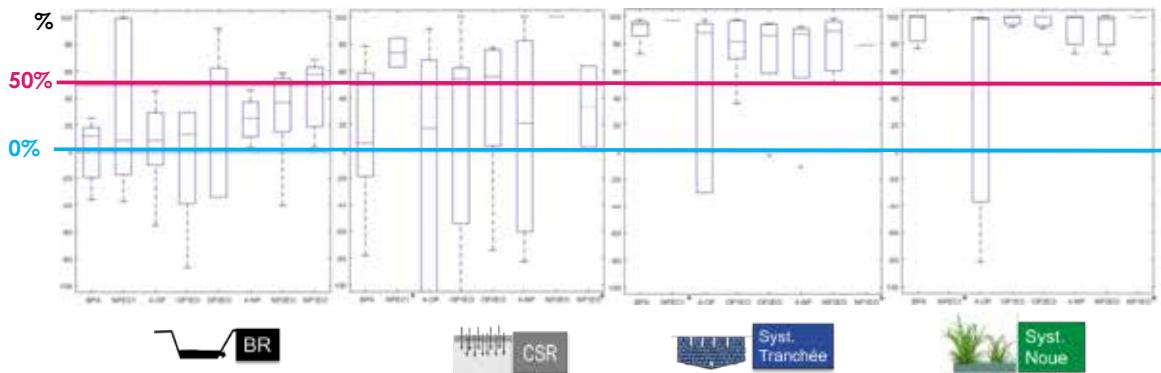
Pour cela, l'efficacité événementielle a été analysée en termes de volumes d'eau, de concentrations et de masses de micropolluants (ramenées au mètre carré actif) de manière à pouvoir comparer les dispositifs entre eux. Les micropolluants

Abattement en masse/m<sup>2</sup> actif des rejets en Pesticides



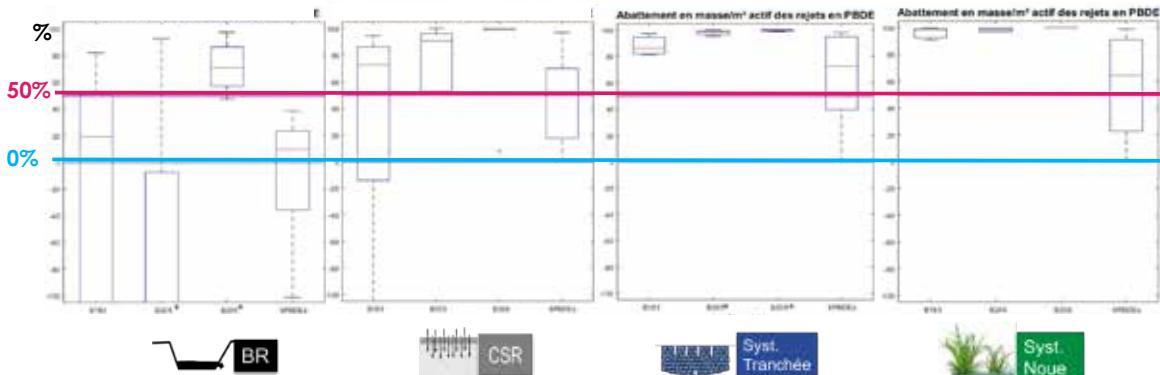
Liste des Pesticides analysés : Carbendazime, Atrazine, Diuron

Abattement en masse/m<sup>2</sup> actif des rejets en Alkylphénols



Liste des Alkylphénols analysés : BPA, NPEC1, 4-OP, OP1EO, 4-NP, NP2EO, NP1EO

Abattement en masse/m<sup>2</sup> actif des rejets en PBDE



considérés sont issus de six grandes familles (HAP, métaux, bisphénol A, alkylphénols, pesticides, PBDE) sélectionnés pour avoir souvent été détectés dans les EP (voir Question 5.1 : *Qu'est-ce que la pollution des eaux pluviales ?*).

La recherche s'est appuyée sur le suivi :

- de trois systèmes à la source drainant des eaux de ruissellement de parking sur le campus LyonTech la Doua à Villeurbanne: Deux sont des parkings de même facture d'environ 300 m<sup>2</sup> dont les eaux sont évacuées, l'un par une noue végétalisée et l'autre par une tranchée de graves. Le troisième est un parking en chaussée à structure réservoir (CSR) à revêtement drainant de 94 m<sup>2</sup>. Les ouvrages sont étanchés pour les besoins expérimentaux. Une zone de référence en chaussée traditionnelle permet une comparaison des flux d'eau et de polluants;
  - d'un système centralisé (bassin de retenue Django-Reinhardt) qui draine 185 ha imperméabilisés à 70% environ au moyen d'un réseau séparatif. Là encore la comparaison avec un système traditionnel (réseau séparatif pluvial se jetant dans le bassin) sert de référence pour la mesure de l'efficacité.

### **Les principales tendances observées**

**Les micropolluants sont bien présents dans les EP collectées par les dispositifs traditionnels**

En entrée du bassin de retenue (c'est à dire en sortie de bassin versant) comme en sortie du parking imperméable, les micropolluants sont bien présents. Toutes les substances recherchées ont été détectées au moins une fois sur un des sites à l'exception du dibenzo (a, h) anthracène (un HAP). Les eaux sont sans surprise chargées en métaux ou métalloïdes ( $\text{As}^{\text{1}}$ ,  $\text{Cr}^{\text{1}}$ ,  $\text{Cu}^{\text{1}}$ ,  $\text{Pb}^{\text{2}}$ ,  $\text{Zn}^{\text{1}}$  et  $\text{Cd}^{\text{3}}$ ), en HAP notamment lourds (Fluoranthène<sup>2</sup>, Benzo(b)fluoranthène<sup>3</sup> ou Benzo(g, h, i) pérylène<sup>3</sup>) avec des concentrations proches ou dépassant les valeurs de NQE « Norme de Qualité Environnementale »<sup>4</sup>. En revanche, elles sont relativement peu chargées (valeurs souvent inférieures aux NQE) en pesticides, alkylphénols et PBDE, même si ces trois familles de polluants sont très souvent présentes. L'ensemble des concentrations mesurées se situent dans les fourchettes de valeurs de la littérature quand elles existent.

Enfin, il n'y a pas de différence majeure entre les gammes de concentrations observées en entrée du système centralisé (bassin de retenue) et en entrée des ouvrages à la source. Pour certaines substances, on peut néanmoins noter des valeurs de concentrations médianes plus élevées en entrée du bassin de retenue, qui peuvent s'expliquer par la grande taille du bassin versant.

**Les techniques à la source semblent plus efficaces que le système centralisé pour réduire les flux de micropolluants**

Les efficacités (en masse au mètre carré actif) du bassin de rétention sont, pour la quasi-totalité des substances,

inférieures à celles des ouvrages de gestion à la source (figure 1). En effet, la capacité de décantation du bassin, si elle impacte de manière non négligeable la pollution en phase particulaire (substances majoritairement fixées aux MES comme les métaux, HAP ou PBDE), apparaît comme moins efficace que les processus intervenant au cours de la percolation de l'eau dans les systèmes de gestion à la source, toutes familles de polluants confondues. Par exemple, le substrat végétalisé présent dans la noue est particulièrement efficace. Il ne faut cependant pas tirer de conclusions hâtives sur le rôle joué par la végétation (voir Question 7.2 : *Quel rôle joue le sol dans le piégeage des polluants ?*) : les abattements viennent principalement du massif végétalisé (et non de la végétation seule) couplé à un fort abattement en volume (rétention d'eau).

Notons que pour les substances majoritairement en phase dissoute, comme les pesticides, les concentrations ne sont pas réduites par le bassin de retenue. Pour certains d'entre eux (carbendazime, diuron), des relargages ont même été observés. La réduction des émissions passera donc, dans ce cas, par une réduction des volumes rejetés ou mieux, par l'arrêt de l'utilisation de pesticides.

Enfin, le bassin de retenue, bien que moins performant vis-à-vis des micropolluants, reste plus efficace que le système traditionnel de réseaux notamment pour les métaux et HAP avec des efficacités positives (figure 1).

**L'abattement des volumes constitue un levier efficace dans la limitation des rejets polluants**

L'efficacité des dispositifs étudiés en termes d'abattement des micropolluants se mesure, pour chaque évènement pluvieux, à leur aptitude à réduire les concentrations (processus bio-physico-chimiques) et les quantités rejetées en masse. Ces dernières dépendent évidemment fortement des volumes, les masses étant calculées sur chaque événement comme le produit d'une concentration moyenne événementielle par le volume. Ainsi, réduire les volumes d'eau rejetés est un premier pas pour limiter les flux polluants sortant des dispositifs.

Le bassin de retenue est étanche et abat donc peu de volume d'eau. Ainsi, seul le processus de traitement par décantation permet de réduire le flux de polluants. C'est pourquoi l'efficacité du bassin n'est jugée correcte que pour les polluants particulaires tels que les métaux et les HAP.

À l'inverse, le parking muni de la noue (même si celle-ci est étanchée en fond), présente des abattements très élevés (proche de 100% en médiane) sur pratiquement tous les polluants sélectionnés. Le substrat de la noue absorbe en effet souvent la totalité du volume généré par les pluies (63 % des pluies mesurées) montrant son fort pouvoir de rétention d'eau pour les petites pluies.

<sup>1</sup> Substance à surveiller selon l'arrêté du 17 octobre 2018

<sup>2</sup> Substance prioritaire selon la Directive Cadre Eau, Dir 2013/39/EU

<sup>3</sup> Substance prioritaire dangereuse selon la Directive Cadre Eau. Dir 2013/39/EU

<sup>4</sup>NQE = La Directive Cadre sur l'Eau définit, à son article 2, la Norme de Qualité Environnementale (NQE) comme «la concentration d'un polluant ou d'un groupe de polluants dans l'eau, les sédiments ou le biote qui ne doit pas être dépassée, afin de protéger la santé humaine et l'environnement».

## En Bref...

L'abattement des volumes est un vrai levier pour la limitation des flux de micropolluants. Il peut donc être judicieux de développer une stratégie de réduction des volumes en ayant recours à l'infiltration et la végétalisation. Le dispositif végétalisé montre en effet de bonnes performances pour la plupart des substances. La métropole de Lyon l'a bien compris : elle préconise de déconnecter les eaux du réseau pour les pluies de moins de 15 mm (80 % des pluies annuelles sur son territoire) et promeut largement le concept de « Ville perméable ».

## POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Garnier R.,** (2020). *Systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales : Contribution à l'analyse de performances conjointes en matière d'hydrologie quantitative et de piégeage de micropolluants. Comparaison systèmes à la source – système centralisé.* Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. 318 p. – [lc.cx/garnier2020](http://lc.cx/garnier2020)
- ▶ **Sébastien C.,** (2013). *Bassin de retenue des eaux pluviales en milieu urbain : performance en matière de piégeage des micropolluants.* Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. 318 p. – [lc.cx/sebastian2013](http://lc.cx/sebastian2013)

# Comment concevoir un bassin de retenue-décantation efficace en matière de piégeage des sédiments et de la pollution particulière ?

Gislain Lipeme Kouyi, INSA Lyon

**Les bassins de retenue-décantation consistent à stocker des eaux de ruissellement pluvial pendant un certain temps afin de permettre une dépollution de ces eaux par décantation. Mais pour que ces ouvrages soient réellement efficaces, plusieurs facteurs sont à prendre en compte lors de la phase de conception.**

## Qu'est-ce qu'un bassin de retenue-décantation ?

Les ouvrages dédiés à gérer les flux d'eau et assurer la dépollution des eaux de ruissellement pluvial grâce à une séparation solide-liquide par décantation sont appelés bassins de retenue-décantation. Les bassins de retenue-décantation étudiés dans le cadre de l'OTRU sont dits « secs » (par opposition aux bassins dits « en eau »). Ces bassins « secs », largement répandus, sont conçus pour se vidanger au bout de 24 à 30 heures de façon à pouvoir être fonctionnels lors de l'événement pluvieux suivant. De façon générale, les bassins de retenue-décantation remplissent trois fonctions principales à prendre en compte dès la conception du bassin :

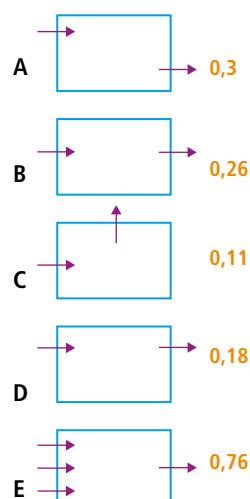
- ▶ protéger les secteurs en aval contre les inondations ;
- ▶ permettre une dépollution des eaux de ruissellement grâce à la séparation solide-liquide par décantation ;
- ▶ éviter la remise en suspension des dépôts ainsi constitués.

**Figure 1 :** Exemples de géométrie pour le cas de bassins de retenue-décantation (vue en plan) selon (Persson, 2000). L'indicateur donne un score global au bassin en termes d'efficacité.

Les modèles conseillés sont : E, G, I, J, P, Q.

Les profondeurs sont comprises entre 0,5 et 2 m.

Les rapports « longueur sur largeur » pour les modèles E, I et J sont respectivement de 2, 4 et 12.



Ces deux dernières fonctions sont complémentaires pour réduire les risques de pollution à l'aval, qu'il s'agisse d'eaux de surface ou eaux souterraines et limiter les risques de colmatage si l'eau transite par un bassin d'infiltration connecté au bassin de retenue.

## Plusieurs facteurs clés à prendre en compte

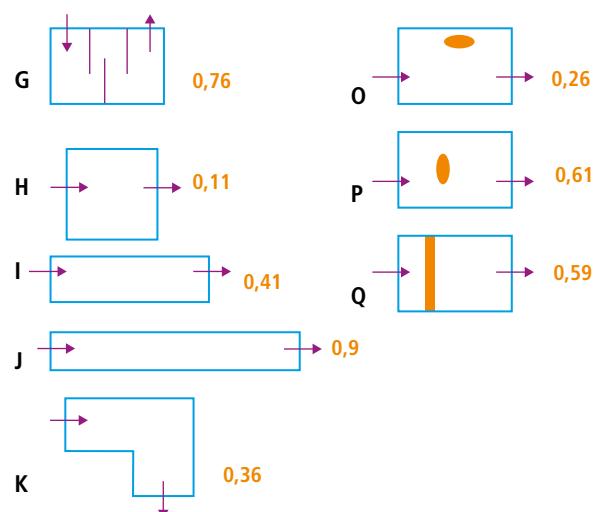
Pour pré-dimensionner ces bassins à des fins hydrauliques, plusieurs méthodes sont couramment utilisées : la méthode des pluies<sup>1</sup>, la méthode des volumes<sup>2</sup> ou pour les dimensionner et les simuler : la méthode des débits<sup>3</sup>.

Cependant ces méthodes ne permettent pas d'évaluer une quelconque efficacité de traitement de la pollution. Un des aspects majeurs pour la prendre en compte qualitativement est d'essayer d'assurer des conditions tranquillisées (non turbulentes) dans les bassins.

Une ancienne étude menée sur la base de modélisation (Persson, 2000) montre l'impact de du design des bassins sur leur efficacité ; les bassins étaient tous de mêmes capacités, mêmes sollicitations d'entrée et niveau de régulation en sortie (figure 1). Elle permettait d'identifier des éléments concrets pouvant être utilisés de manière simple :

▶ **Nombre d'entrées**: il est préférable d'avoir plusieurs entrées plutôt qu'une seule (modèle E, figure 1). En

<sup>1</sup> Ic.cx/methodepluies – <sup>2</sup> Ic.cx/methodevolumes – <sup>3</sup> Ic.cx/methodededebits



cas d'entrée unique, mettre en place des dissipateurs ou d'autres formes d'obstacle pour ralentir l'écoulement (modèles P et Q, figure 1).

► **Géométrie du bassin** et rapport d'aspect ou rapport « longueur sur largeur » pour le cas des bassins rectangulaires : pour une géométrie rectangulaire, il est préférable de construire un bassin plus long que large (sur le modèle J de la figure 1, le bassin est 12 fois plus long que large).

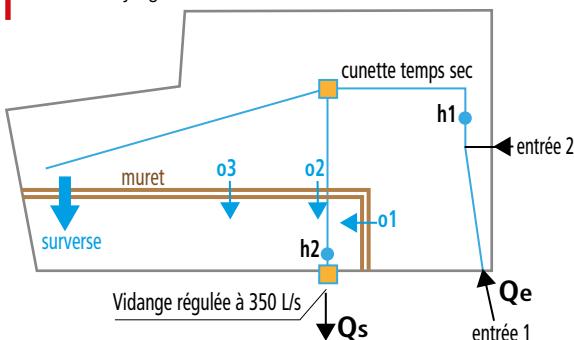
► **Aménagement intérieur**: dans le but d'atténuer la turbulence, ralentir l'écoulement et rallonger le temps de séjour, il est conseillé de compartimenter le bassin en installant des murets ou cloisons ou de mettre en place des chicanes (G) même si cette dernière configuration n'est pas optimale pour l'entretien. Ces aménagements internes permettent également d'éviter la remise en suspension des dépôts.

► **Régulation**: le débit de sortie doit être régulé correctement pour éviter tout court-circuit et donc éviter des temps de séjour très courts (inférieurs à 4 heures). Plusieurs dispositifs de régulation existent comme par exemple des vannes équipées d'un flotteur (voir figure 3). On peut rajouter que les flux de sortie gagnent aussi à être répartis.

## Un bassin réhabilité pour améliorer ses performances

Le bassin de retenue-décantation Django-Reinhardt est situé à l'exutoire d'un bassin versant industriel de 185 ha imperméabilisé à 70%. Ce bassin a une superficie au sol de 1 ha environ et un volume maximal d'environ 32 000 m<sup>3</sup> (figure 2). Le rapport « longueur sur largeur » est de l'ordre de 3. Le bassin a deux entrées dont une entrée majoritairement sollicitée (entrée 1 sur la figure 2). La canalisation circulaire de 600 mm de diamètre reliant les bassins de retenue-décantation et d'infiltration est équipée d'une vanne de régulation (figure 3), avec un débit de sortie régulé à 350 L/s. C'est un bassin à ciel ouvert, et qui doit être sec entre deux événements pluvieux.

**Figure 2 :** Schéma simplifié du bassin de retenue-décantation Django-Reinhardt.



Qs : débit de sortie (vers le bassin d'infiltration) – Qe : débit d'entrée

o1 : orifice n° 1 – o2 : orifice n° 2 – o3 : orifice n° 3

h1 : capteur de hauteur d'eau n° 1 – h2 : capteur de hauteur d'eau n° 2

■ Fosse de décantation des eaux de temps sec

Les mesures en continu de turbidité transformée en concentrations en MES en entrée et en sortie et le peu de dépôts observés alors dans le bassin montraient clairement qu'il n'avait un design satisfaisant pour piéger les sédiments et les polluants associés. Il a donc été réhabilité en 2004 dans le but d'améliorer ses performances pour le piégeage des polluants particulaires. Il a d'abord été partitionné par un muret. Trois orifices à travers le muret de séparation et une surverse ont ainsi été ajoutés dans le bassin afin de rallonger le temps de séjour et améliorer l'efficacité de piégeage des polluants particulaires avant transfert vers le bassin d'infiltration.

## La modélisation 3D comme outil de conception

La modélisation 3D est une approche qui permet de prédire les zones d'accumulation au sein de ce type d'ouvrage (voir les résultats du projet ANR CABRRES - lc.cx/cabrres). Cette approche tridimensionnelle pose les bases d'un outil opérationnel de conception des bassins de retenue-décantation de formes diverses et variées (pas uniquement rectangulaires) dans un objectif de dépollution des eaux de ruissellement pluvial.

**Figure 3 :** Vanne-flotteur à la sortie du bassin de retenue-décantation Django-Reinhardt.



## Une chute de performance au-delà de 5 ans d'accumulation de sédiments

Le fonctionnement hydraulique de cet ouvrage et son comportement vis-à-vis de la pollution ont été ensuite étudiés dans le cadre de plusieurs travaux de thèse (A. Torres, H. Yan, C. Gonzalez-Merchan, C. Sébastien, X. Zhu) et projets de recherche (ANR Ecopluies, ANR Cabrres, Gesol, BRtox, etc.) qui ont exploité les mesures de concentrations en MES en entrée sortie réalisées en continu. Les résultats obtenus montrent que la conception du bassin permet de remplir les trois fonctions principales, à condition de ne pas laisser les sédiments s'accumuler au sein de ce dernier pendant plus de 5 ans. Au-delà de 5 ans d'accumulation, on observe en effet une chute de l'efficacité de piégeage de 80 à 50% (réentrainement d'une partie sédiments déposés)

On trouvera, en complément, la Question 8.7 *Comment évaluer l'efficacité de piégeage d'un bassin de retenue-décantation ?* et à la Question 8.5 *Quelle est l'efficacité des ouvrages alternatifs vis-à-vis des micropolluants ?,* dont le bassin Django-Reinhardt pour une large gamme de polluants tant dissous que particulaires.

### MISE EN GARDE

Il est déconseillé d'installer des fosses à hydrocarbures ou de décantation au sein des bassins de retenue-décantation. Ce type d'aménagement favorise l'enrichissement en certains microorganismes dont des espèces pathogènes, sans améliorer les capacités d'interception des polluants particulaires.

# Comment évaluer l'efficacité de piégeage d'un bassin de retenue-décantation ?

Gislain Lipeme Kouyi, INSA Lyon

**Les bassins de retenue-décantation des eaux pluviales ont pour fonctions principales de protéger les zones situées à l'aval du risque d'inondation, et de piéger les polluants particulaires en vue de préserver la qualité des milieux. Mais une grande partie de ces bassins ont été initialement conçus dans l'objectif exclusif d'atténuer les débits de pointe. Par conséquent, leur efficacité de dépollution est très variable et ne peut être évaluée que par une étude au cas par cas.**

## L'efficacité de piégeage est variable et dépend de plusieurs facteurs

Au cours des deux dernières décennies, des recherches ont été menées dans le but d'améliorer les performances des bassins de retenue-décantation pour le piégeage des polluants et micropolluants particulaires (Torres, 2008; Sébastien *et al.*, 2015). Cette efficacité de piégeage ou d'interception dépend de plusieurs facteurs, notamment:

- ▶ la géométrie de l'ouvrage;
- ▶ les caractéristiques bio physico-chimiques des polluants particulaires;
- ▶ le comportement hydrodynamique du bassin. Ainsi, selon leur conception, ces ouvrages peuvent être inefficaces ou très performants, avec des taux d'abattement pouvant atteindre 90 %.

La quantification du taux d'abattement de la pollution particulaire par un bassin de retenue peut se faire de deux manières :

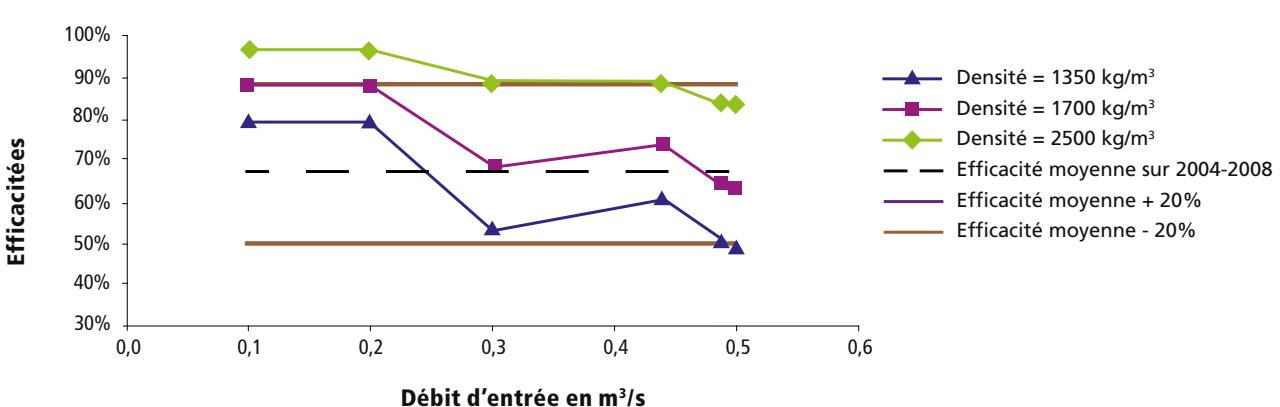
- ▶ soit en mesurant les masses en entrée et sortie de l'ouvrage;
- ▶ soit en modélisant le comportement hydrodynamique de l'ouvrage et le transport des polluants particulaires en son sein.

## Des capteurs in situ pour évaluer les charges polluantes

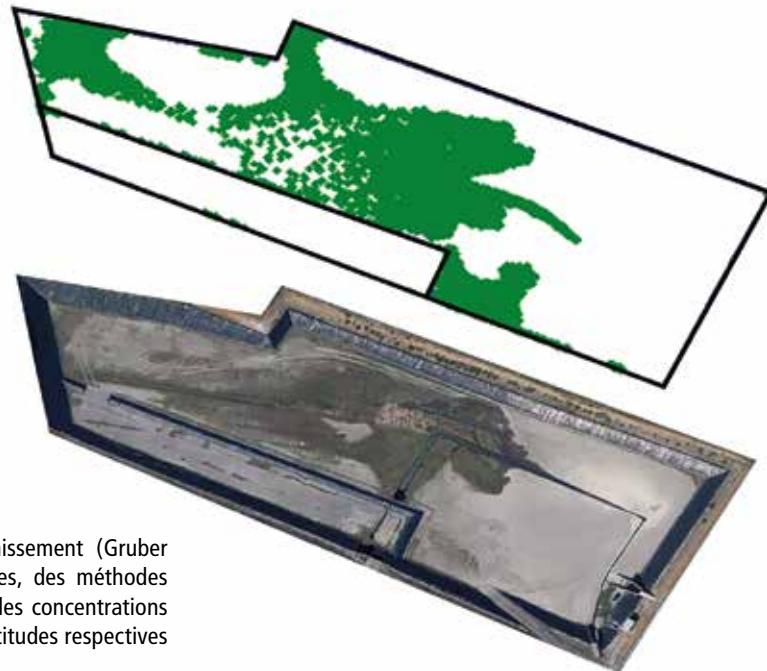
L'exploitation des mesures de charges polluantes permet d'évaluer l'efficacité de piégeage des polluants particulaires par l'ouvrage. Jusqu'à récemment, les charges en matières en suspension (MES) et en demande chimique en oxygène (DCO) étaient estimées exclusivement à partir d'analyses en laboratoire d'échantillons collectés pendant les événements pluvieux. Cette pratique connaît plusieurs limites: faible représentativité temporelle, transport, conservation et préservation des échantillons, délais pour avoir des résultats,. En effet, en raison des coûts expérimentaux et d'analyse élevés, seulement quelques échantillons peuvent être collectés pour chaque événement (normalement jusqu'à 24 échantillons en raison des contraintes techniques des préleveurs automatiques) et seulement quelques événements par an peuvent être mesurés. Les résultats ainsi obtenus ne fournissent pas d'information précise ni complète en ce qui concerne la dynamique des flux polluants (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2008).

Une solution alternative consiste à utiliser des capteurs in situ avec des pas d'acquisition de données courts et capables de fournir des séries temporelles qui puissent être converties en concentrations en MES et en DCO. Parmi les capteurs existants sur le marché, seuls les turbidimètres et les spectromètres UV-visibles semblent pouvoir être utilisés in situ avec un niveau acceptable de fiabilité, au regard des conditions particulières

Figure 1 : Comparaison des efficacités mesurées et modélisées pour différentes densités de sédiments (Yan *et al.*, 2014).



**Figure 2:** Comparaison des zones de dépôt simulées (en vert) et observées dans le bassin de Django-Reinhardt.



de fonctionnement des réseaux d'assainissement (Gruber et al., 2006). Sur la base de ces mesures, des méthodes spécifiques sont appliquées pour évaluer les concentrations équivalentes en MES et DCO et leurs incertitudes respectives (Bertrand-Krajewski, 2004).

### La modélisation 3D permet également d'évaluer l'efficacité de piégeage

Un modèle hydrodynamique 3D du bassin de retenue-décantation Django Reinhardt a été développé dans le but de simuler la répartition spatiale des sédiments. Le modèle 3D mis au point permet de prendre en compte la décantation et la remise en suspension des sédiments en place et entrant, pour un débit d'entrée donné. La prise en compte de la décantation et de la remise en suspension se fait à partir de la comparaison entre l'énergie cinétique turbulente (liée à l'écoulement) et l'énergie cinétique transportée par les particules (calculée à partir de leurs vitesses de chute). Si l'énergie cinétique transportée par une particule est supérieure à celle liée à l'écoulement, alors la particule décante; dans le cas contraire, elle est remise en suspension. La figure 2 montre la répartition spatiale des sédiments au sein du bassin de retenue-décantation. La répartition spatiale simulée (particules « vertes ») est en adéquation avec celle observée depuis 2006. L'efficacité d'interception des polluants particulaires a également été reproduite par modélisation (Yan et al., 2014). Ce modèle pose les bases d'un outil opérationnel de conception des bassins de retenue-décantation dans un objectif de dépollution.

### En Bref...

La mise en place d'un suivi en continu de la turbidité avec un pas de temps fin (2 minutes pour le cas du site OTHU Django-Reinhardt) en entrée et sortie d'ouvrage et la modélisation 3D de l'hydrodynamique et du transport solide permettent d'accéder au taux de piégeage des polluants particulaires. Cette efficacité de piégeage dépend principalement de la géométrie de l'ouvrage et des caractéristiques physico-chimiques des polluants particulaires véhiculés.

### POUR ALLER PLUS LOIN

#### Estimation des concentrations en MES à partir de la turbidité :

- ▶ **Bertrand-Krajewski J.-L., Barraud S., Lipeme Kouyi G., Torres A., & Lepot M.**, (2008). Mesurages en continu des flux polluants particulaires en réseaux d'assainissement urbains : enjeux, méthodes, exemple d'application. *La Houille Blanche*, 4, 49-57 – <https://doi.org/10.1051/lhb:2008039> – lc.cx/bertrand2008

#### Modélisation 3D de l'hydrodynamique et du transport solide au sein d'un bassin de retenue-décantation :

- ▶ **Yan H., Lipeme Kouyi G., Gonzalez-Merchan C., Bécouze-Lareure C., Sébastien C., Barraud S., Bertrand-Krajewski J.-L.**, (2014). Computational Fluid Dynamic modeling of flow and particulate contaminants sedimentation in an urban stormwater detention and settling basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8), 5347-5356. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2455-6> – lc.cx/yan2014
- ▶ **Yan H., Vossenwinkel N., Ebbert S., Lipeme Kouyi G., Mohn R., Uhl M., & Bertrand-Krajewski J.-L.**, (2020). Numerical investigation of particles' transport, deposition and resuspension under unsteady conditions in constructed stormwater ponds. *Environmental Sciences Europe*, 32, 76. Open access <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00349-y> – lc.cx/yan2020

# Quels sont les éléments à prendre en compte pour la gestion des sédiments des bassins de retenue-décantation ?

Gislain Lipeme Kouyi, INSA Lyon - Claire Gibello, Nelly Maamir, Métropole de Lyon - Laure Wiest, ISA - Jean-Yves Toussaint, Sophie Vareilles, EVS - Benoit Cournoyer, Vetagro Sup /Université Lyon 1 CNRS - Yves Perrodin, ENTPE - Céline Becouze-Lareure, Roannaise de l'eau - Sylvie Barraud, INSA DEEP

**Comme de nombreuses collectivités, la Métropole de Lyon a vu augmenter considérablement son patrimoine d'ouvrages de rétention ou d'infiltration des eaux pluviales et est confrontée à la gestion des sédiments qui s'y déposent. Les questions qu'elle a fait remonter aux chercheurs de l'OTHU ont notamment été les suivantes : Quelle conception des ouvrages ? Faut-il les curer ? À quelle fréquence ? En quelle saison ? Quelle technique de curage utiliser ? Existe-t-il des filières spécifiques de traitement / de valorisation ? Ces questions ont nourri le programme de recherche pluridisciplinaire CABRRES qui a permis d'apporter aux opérationnels des éléments de réponses importantes.**

## Quelques règles pour optimiser la conception des ouvrages

Initialement conçus pour des besoins hydrauliques, les ouvrages de retenue-décantation et d'infiltration des eaux pluviales ont des géométries diverses et variées. Or, cette géométrie influence largement la décantation. La modélisation hydrodynamique 3D mise au point dans le cadre de CABRRES permet de comprendre le fonctionnement et d'optimiser la conception ou la réhabilitation des ouvrages. Celle-ci a notamment mis en lumière que des formes sont plus adaptées que d'autres pour l'interception des pollutions par décantation.

Ainsi, la géométrie de l'ouvrage doit permettre un temps de séjour d'eau moins 3 heures dans le bassin de retenue. Comme expliqué ci-après, il convient également d'éviter les fosses de décantation.

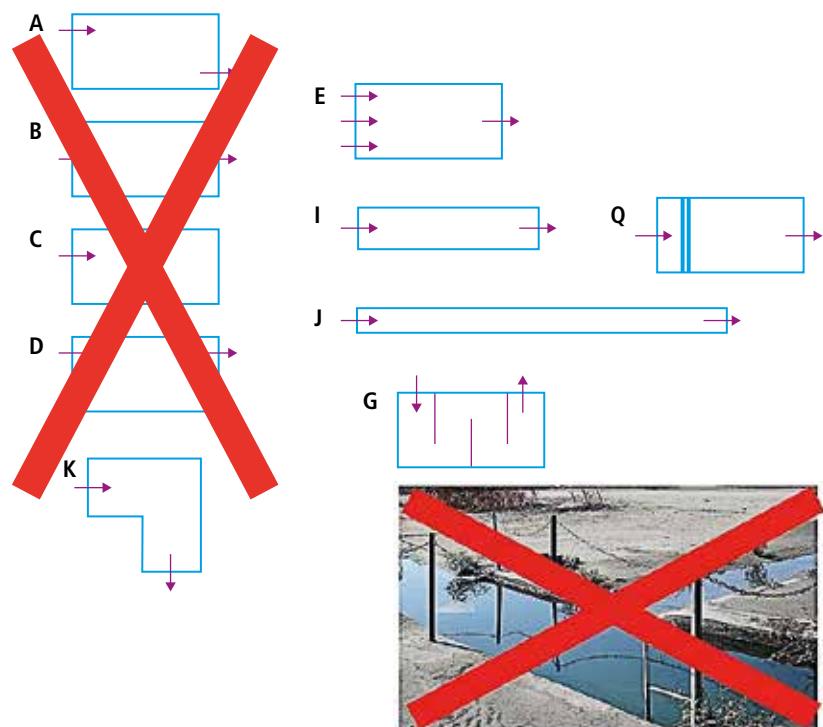
Figure 1 : Quelques règles pour mieux concevoir les bassins de retenue-décantation

**Avoir plusieurs entrées** plutôt qu'une seule. En cas d'entrée unique, mettre en place des dissipateurs ou d'autres formes d'obstacle pour ralentir l'écoulement.

**Construire un bassin plus long que large** (rapport longueur sur largeur de 12 pour un bassin rectangulaire par exemple).

**Compartimenter le bassin** en installant des murets ou cloisons ou en mettant en place des chicanes, dans le but d'atténuer la turbulence, ralentir l'écoulement, rallonger le temps de séjour et éviter la remise en suspension.

Persson (2000)



## **Plusieurs enseignements pour limiter la pollution et la toxicité des sédiments**

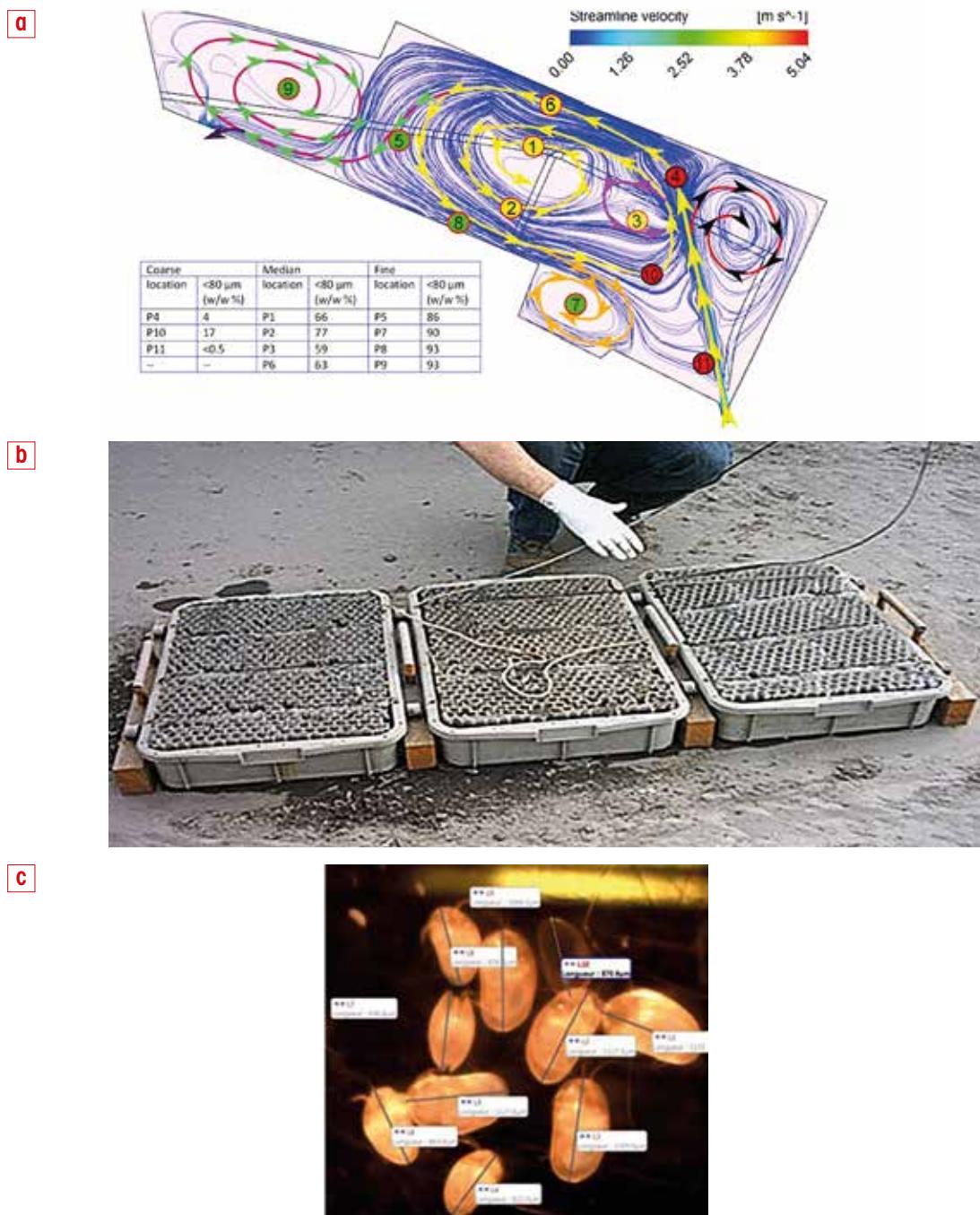
Les méthodes d'échantillonnage et d'analyses chimiques et biologiques utilisées et mises au point dans CABBRES se sont avérées pertinentes et ont mis en évidence une pollution des sédiments (voir Question 5.4: *Comment connaître la pollution des sédiments des bassins de rétention ?*). Ces derniers sont surtout contaminés par des Hydrocarbures

Aromatiques Polycycliques (HAP), des métaux et certains PolyBromoDiphénylether (PBDE: retardateurs de flamme). Ils contiennent peu de pesticides car ces derniers sont essentiellement sous forme dissoute (Sébastien, 2013). On y retrouve également de manière récurrente le 4-Nonylphénol (composé de la famille des alkylphénols) et le Bisphénol A. Ces sédiments sont également très chargés en fer.

Les résultats ont confirmé qu'il fallait éviter d'installer une fosse de décantation dans l'ouvrage de retenue (figure 1). En effet, l'accumulation des contaminants y développe

**Figure 2:** Illustration des outils et méthodes développés au sein de l'OTHU pour la gestion des sédiments :

- (a) Modèle 3D hydrodynamique.
  - (b) Technique échantillonnage des sédiments de bassins par quartage (voir fiche technique OTHU n° 27 : [lc.cx/ficheothu27](#)).
  - (c) Modèle biologique ostracode (microcrustacé) connu et normalisé (norme ISO 14371) pour qualifier les sédiments des bassins de rétention-décantation, et décider du bon moment pour le curage, et prioriser les sédiments selon leur qualité.



un véritable bouillon de culture qui accroît la toxicité des sédiments, mise en évidence par la mortalité observée lors du bioessai ostracodes (crustacés microscopiques). De plus, la fosse favorise une population bactérienne particulière, différente de celle des autres points à l'intérieur ou à l'extérieur du bassin, dont des colonies pathogènes (parmi lesquelles des *Pseudomonas* ou *Nocardia*).

Concernant le curage, il semble qu'une fréquence de 5 ans soit un bon compromis : cette période permet une certaine homogénéisation des sédiments et une baisse de l'écotoxicité du fait de leur maturation. Au-delà de 5 ans, l'efficacité de piégeage diminue. Le test ostracode est quant à lui un bioindicateur prometteur pour décider du moment opportun pour réaliser le curage, même s'il ne donne pas nécessairement accès à une valeur seuil : le niveau de mortalité de référence doit être pris en compte. Il convient de poursuivre la recherche pour affiner ces éléments.

### **Le lieu, la nature et l'agencement des aménagements urbains influencent la pollution des eaux de ruissellement qui alimentent les ouvrages**

Dans le cadre de CABRRES, une enquête socio-urbanistique a été menée sur le bassin versant industriel raccordé au bassin de retenue-décantation Django-Reinhardt. L'objectif de cette enquête était d'établir un lien entre les objets mobilisés dans les activités humaines, la contamination particulaire, chimique et biologique des eaux de ruissellement et celle que l'on retrouve ensuite dans les sédiments des bassins de retenue-décantation et d'infiltration.

Les aménagements urbains (avenues, rues, impasses...) sont le support et la condition des activités. En clair, le lieu où se déroule l'activité (le support) ainsi que l'agencement et la nature des aménagements urbains (la condition) influencent directement les activités qui vont se dérouler. Par exemple, il a été observé une présence de déchets (emballages alimentaires, déchets liés à l'hygiène, excréments humains, etc.) dans les rues et les impasses, fortement liée au stationnement nocturne de poids lourds. En effet, l'enquête a révélé une problématique des besoins hygiéniques des conducteurs de poids lourds (les analyses microbiologiques confirment une forte contamination fécale sur la zone). Les coins plus isolés permettent et appellent donc des pratiques qui n'ont d'autres espaces ou dispositifs pour se réaliser. Par conséquent, l'installation de poubelles, de toilettes, voire de points d'eau ou d'aires d'accueil pour poids lourds pourrait améliorer la situation.

Enfin, il a été constaté une porosité entre les espaces publics et les espaces privés, participant aux processus de contamination de l'espace public (eaux de ruissellement de l'espace privé qui s'écoule vers la rue).

### **Perspectives de gestion et de traitements des sédiments de curage**

Afin d'identifier les possibilités de gestion et de valorisation des sédiments ainsi que les éventuelles nécessités de traitement, un projet DESIR (Développement et évaluation de stratégies de gestion durable des sédiments de bassins d'infiltration et de rétention des eaux pluviales - lc.cx/desir) a débuté en 2020.

### **En Bref...**

#### **Quelques clés de gestion :**

- ▶ Concevoir ou réhabiliter des ouvrages sans fosse de décantation et avec un temps de séjour d'eau moins 3 heures.
- ▶ Curer avec une fréquence de l'ordre de 5 ans, avec un masque de protection, plutôt l'hiver pour éviter le risque d'aérosolisation et bénéficier d'une plus faible activité des bactéries.
- ▶ Le traitement des sédiments par maturation est prometteur. Il convient de poursuivre la recherche.
- ▶ Les aménagements urbains et les activités qui s'y développent ont une influence sur la contamination des sédiments. Il est possible d'agir aussi à ce niveau.

**Des outils et des méthodes sont disponibles pour appuyer les collectivités dans la gestion des sédiments.**



## POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Barraud S., De Becdelièvre L., Bedell J.-P., Delolme C., Perrodin Y., Winiarski T., Bacot L., Brelot E., Soares I., Desjardin-Blanc V., Lipeme Kouyi G., Malard F., Mermilliod-Blondin F., Gibert J., Herbreteau B., Clozel B., Gaboriau H., Seron A., Come J.-M., Kaskassian S., Verjat J.-L., Bertrand-Krajewski J.-L., Cherqui F.**, (2009). L'infiltration en questions. Guide édité dans le cadre du projet ECOPLUIES – ANR PRECODD – [lc.cx/ecopluires](http://lc.cx/ecopluires)
- ▶ **Programme de recherche ANR CABRRES.** Caractérisation chimique, microbiologique, écotoxicologique, spatio-temporelle des contaminants des bassins de retenue des eaux pluviales urbaines : évaluation et gestion des risques environnementaux et sanitaires associés - 2012-2017 – [lc.cx/cabres](http://lc.cx/cabres)

