



ACTION 5.1 : CONCEVOIR ET OPTIMISER LA GESTION HYDROLOGIQUE DU RUISSELLEMENT POUR UNE MAITRISE A LA SOURCE DE LA CONTAMINATION DES EAUX PLUVIALES URBAINES

CONTEXTE

La maîtrise des eaux pluviales urbaines constitue aujourd'hui un enjeu important, non seulement pour se prémunir des inondations, mais aussi pour limiter la dégradation des milieux aquatiques superficiels. Face à l'insuffisance des systèmes d'assainissement traditionnels, la gestion à la source des eaux pluviales, dans des dispositifs de stockage à ciel ouvert relativement simples et intégrés au milieu urbain, s'est progressivement imposée comme une solution permettant à la fois de limiter la fréquence des dysfonctionnements des réseaux d'assainissement et de réduire de façon significative les flux de contaminants dirigés vers l'aval en favorisant notamment l'infiltration ou l'évapotranspiration d'une partie des volumes capturés. Bien qu'offrant des perspectives pour une meilleure maîtrise des flux de polluants, la conception de ces « techniques alternatives » ne répond le plus souvent qu'à un objectif de gestion strictement hydraulique du ruissellement, destiné à éviter une surcharge des réseaux pendant les événements exceptionnels. Néanmoins, l'évolution du contexte réglementaire, accordant une importance croissante à la maîtrise des rejets de polluants vers les milieux aquatiques superficiels (notamment à travers la Directive européenne Cadre sur l'Eau DCE/2000/60/CE), et les limites techniques ou financières des dispositifs conventionnels de dépollution des eaux pluviales font aujourd'hui de la gestion à la source du ruissellement une solution privilégiée pour la maîtrise de la pollution diffuse. Les résultats obtenus dans le cadre d'une précédente action du programme OPUR (thèse d'Adèle Bressy en 2010) indiquent que l'efficacité des dispositifs de gestion à la source, très dépendante des abattements volumiques par infiltration ou évapotranspiration, demeure à ce jour variable d'une réalisation à l'autre faute de règles de conceptions véritablement adaptées à l'objectif de maîtrise des flux de contaminants. La compréhension de l'incidence du fonctionnement hydrologique des techniques alternatives sur la maîtrise flux apparaît donc indispensable pour une gestion plus efficace de la contamination des eaux pluviales urbaines.

OBJECTIFS

Les objectifs de cette action de recherche, menée dans le cadre de la thèse de Jérémie Sage (2016), étaient :

- D'analyser l'incidence du fonctionnement hydrologique des techniques alternatives sur les flux d'eaux et de polluants rejetés vers les milieux récepteurs en faisant appel à la modélisation
- D'orienter le dimensionnement et la conception des dispositifs de gestion vers des solutions permettant une maîtrise optimale du ruissellement et de la contamination des eaux pluviales urbaines

METHODOLOGIE

1. Analyse des pratiques de gestion des eaux pluviales

Cette action de recherche s'est dans un premier temps appuyée sur une analyse des pratiques de gestion des eaux pluviales urbaines destinée à identifier les différentes stratégies pouvant être préconisées pour une maîtrise à la source des flux de contaminants, en s'intéressant notamment à leur éventuelle déclinaison sous la forme d'objectifs hydrologiques ou de critères de conception des techniques alternatives. Une synthèse des critères de gestion des eaux pluviales utilisés en France ou à l'international a pu être établie sur la base de nombreux documents techniques ou réglementaires. La pertinence de ces critères a alors été discutée, en considérant non seulement leur aptitude à traduire l'objectif de maîtrise des flux de contaminants, mais aussi leurs implications quant à la nature ou la conception des solutions mises en œuvre. Une étude plus spécifique des pratiques de conception des techniques alternatives a par la suite été réalisée de manière à identifier les contraintes liées à leur fonctionnement ou à leur intégration en milieu urbain. L'analyse bibliographique a alors été complétée par une dizaine d'entretiens réalisés auprès d'acteurs opérationnels (essentiellement issus de bureaux d'études ou de services techniques de collectivités territoriales).

2. Construction d'une chaîne de modélisation pour l'étude du fonctionnement des techniques alternatives

L'analyse de l'incidence du fonctionnement hydrologique des techniques alternatives s'est appuyée sur le développement d'une chaîne de modélisation « surface urbaine + ouvrage » permettant de simuler, pour des périodes longues de précipitations, différents scénarios de conception des dispositifs de gestion, en considérant des dynamiques variées de production des flux d'eau et de contaminants au niveau du bassin versant d'apport (cf. Figure 1). Le principe

de cette chaîne de modélisation était alors d'intégrer des modèles relativement simples, permettant d'effectuer avec des temps de calcul réduits un nombre important de simulations afin d'évaluer de manière aussi systématique que possible l'influence du comportement des surfaces d'apport et de la conception des ouvrages sur les rejets d'eau et de contaminants vers les réseaux ou les milieux récepteurs. Deux dynamiques d'émission ont en particulier été considérées pour la modélisation des surfaces de production : les matières en suspension (MES) lessivées au niveau des chaussées urbaines et le zinc dissous au niveau d'éléments de toiture métallique. La modélisation de l'ouvrage reposait quant à elle sur une approche strictement hydrologique supposant que la réduction des flux de contaminants était uniquement expliquée par les abattements volumiques associés aux pertes par infiltration ou évapotranspiration (ce choix étant essentiellement motivé par le fait, qu'à l'amont, les abattements en masses ne s'accompagnent pas nécessairement d'une diminution des concentrations à l'exutoire des dispositifs de gestion et sont donc essentiellement le résultat d'un abattement volumique).

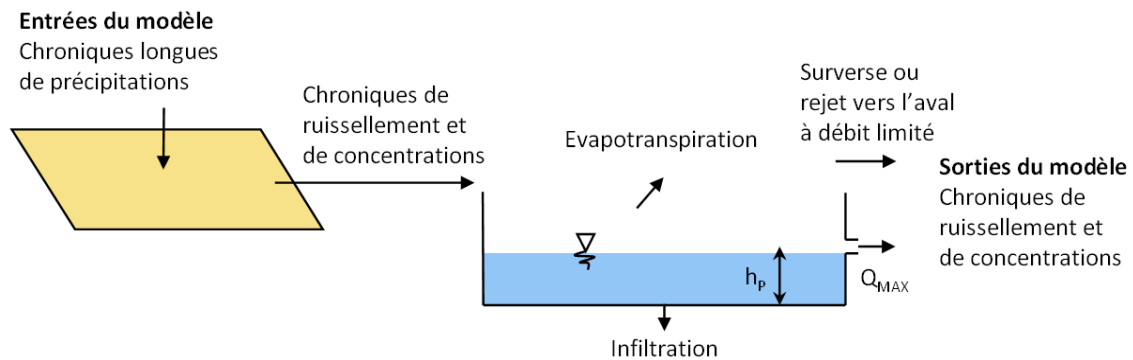


Figure 1. Schéma de principe de la chaîne de modélisation mise en œuvre pour l'analyse du fonctionnement des techniques alternatives

Dans le cadre de ce travail, la description de (1) la variabilité inter et intra-événementielle des concentrations en polluants dans le ruissellement et (2) des pertes hydrologiques (par infiltration ou évapotranspiration) dans l'ouvrage ont fait objet d'un approfondissement afin d'évaluer la validité des modèles actuels et proposer si nécessaire des schémas de modélisation plus adaptés.

Modélisation de la dynamique d'émission des contaminants. En hydrologie urbaine, la modélisation de la dynamique d'émission des contaminants repose le plus souvent sur des modèles relativement simples, dits « d'accumulation lessivage », permettant d'envisager la variabilité des concentrations dans le ruissellement comme le résultat d'une mobilisation par temps de pluie d'un stock de polluants accumulé par temps sec au niveau des surfaces urbaines. Bien que de nombreuses variantes de ces modèles aient été introduites, ces dernières ont jusqu'alors essentiellement été appliquées à la modélisation de polluants particuliers à l'exutoire de bassins versants de taille importante. Différents résultats de la littérature suggèrent par ailleurs que le pouvoir prédictif de ces modèles pourrait avoir été largement surévalué faute d'observations sur des périodes suffisamment longues des concentrations dans les eaux de ruissellement (Kanso, 2004 ; Dotto, 2011).

Une évaluation, à partir (1) de données expérimentales plus complètes que les observations réalisées jusqu'alors et (2) de méthodes avancées d'analyse des incertitudes, de la capacité de ces modèles à simuler pour des périodes longues de précipitations des chroniques réalistes de concentrations en amont des techniques alternatives est donc apparue nécessaire. Pour les MES, l'analyse a été conduite à partir de mesures fines et en continu de débit et de turbidité, sur une période de 11 mois, à l'exutoire d'une chaussée urbaine. La variabilité temporelle des concentrations en zinc dans le ruissellement, à l'échelle de l'évènement pluvieux, n'ayant fait l'objet que d'un nombre limité d'études, l'intégration de cette dynamique d'émission à la chaîne de modélisation, a quant à elle conduit au développement d'un modèle (adapté des formules usuelles d'accumulation-lessivage) spécifiquement destiné à reproduire les émissions au niveau des toitures en zinc. Ce travail s'est appuyé sur l'acquisition de mesures de concentration sur des bancs d'essais en zinc dans des conditions réelles d'exposition aux intempéries et pour des conditions contrôlées (simulation de pluie) afin de préciser l'influence des différents paramètres pluviométriques sur les niveaux de contamination observés.

Modélisation des pertes hydrologiques. La description des processus d'infiltration et d'évapotranspiration peut faire appel à des modèles de complexité très variable et les résultats de la littérature ne permettent pas réellement de déterminer le niveau de détail nécessaire pour la modélisation des pertes hydrologiques dans les dispositifs de gestion à la source du ruissellement. Bien souvent, des approches excessivement simples, ne tenant que partiellement compte de la variabilité temporelle des flux d'infiltration et négligeant l'incidence l'état hydrique du sol sur l'infiltration, sont adoptées pour la modélisation des techniques alternatives. Ici, un schéma d'infiltration permettant de rendre compte de l'évolution des teneurs en eau dans le sol sous l'effet de l'évapotranspiration, et des forces gravitaires et matricielles a donc été développé à partir de travaux antérieurs (Milly, 1988) de manière à modéliser de façon simplifiée mais suffisamment réaliste la variabilité temporelle des flux hydriques dans les ouvrages de gestion (l'objectif étant alors d'intégrer ce modèle à la chaîne de modélisation utilisée pour l'analyse du fonctionnement des techniques alternatives). Ce travail, s'est appuyé sur une comparaison des teneurs en eau dans le sol et des flux d'infiltration simulés par le modèle à ceux obtenus par résolution numérique des équations physiques gouvernant les écoulements dans les sols, pour des cas de figures théoriques et des configurations représentatives des conditions d'infiltration dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales urbaines.

3. Analyse de la chaîne de modélisation et étude du fonctionnement des techniques alternatives

La chaîne de modélisation développée dans le cadre de cette action se révélant assez complexe et faisant intervenir un nombre important de paramètres (ex : paramètres correspondant à des caractéristiques générales de l'ouvrage, paramètres relatifs aux pertes hydrologiques ou à la production des flux d'eau et de polluant sur les surfaces amont...), une analyse de sensibilité approfondie de cette dernière est apparue nécessaire avant d'envisager une application à l'étude de fonctionnement hydrologique des techniques alternatives ou à la conception des ouvrages de gestion à la source du ruissellement. L'objectif de cette analyse était de préciser l'incidence des paramètres de la chaîne de modélisation, dont certains ne pouvaient être que difficilement fixés (ex : paramètres se rapportant à la description des surfaces urbaines, incertains ou susceptibles de varier fortement d'un site à l'autre), pour l'évaluation de l'efficacité des techniques alternatives. Deux catégories de scénarios de gestion ont alors été distinguées : les stratégies de réduction des volumes, pour lesquelles une fraction des volumes ruisselés est infiltrée ou évapotranspirée, et les stratégies de régulation des débits, pour lesquelles une partie des volumes capturés peut être rejetée à débit limité vers l'aval.

Les résultats de cette analyse de sensibilité ont conduit à développer une approximation de la chaîne de modélisation (à partir de résultats de simulation obtenus pour une chronique de pluie de 4 ans en région Ile-de-France) permettant d'estimer l'efficacité des techniques alternatives pour une multitude de scénarios de dimensionnement, caractérisés par un nombre limité de paramètres de conception. L'efficacité des techniques alternatives a ici été exprimée comme un abattement en masse de polluants, c'est-à-dire comme le rapport entre la masse abattue dans l'ouvrage et la masse émise en amont au niveau des surfaces urbaines pour les 4 années de précipitations. Un grand nombre de simulations ont été effectuées pour les différents scénarios de conception considérés afin de rendre compte de la variabilité induite par l'incertitude quant à la valeur des paramètres ne renvoyant pas directement au dimensionnement de l'ouvrage sur les efficacités calculées (cf. figure 2). Cet outil a alors pu être utilisé pour la construction d'abaques faisant apparaître une estimation de l'abattement en fonction de paramètres de conception assez généraux (ratio entre surface d'infiltration et surface d'apport b , profondeur de l'ouvrage h_p , capacité d'infiltration du sol K_S ...). Les efficacités présentées dans ces abaques correspondent au premier décile des abattements obtenus pour chaque scénario de dimensionnement et peuvent donc être interprétées comme des valeurs seuil dépassées pour 90% des configurations considérées. La variabilité des efficacités a quant à elle été exprimée comme l'écart entre le premier et le neuvième décile des abattements simulés pour chaque scénario de dimensionnement.

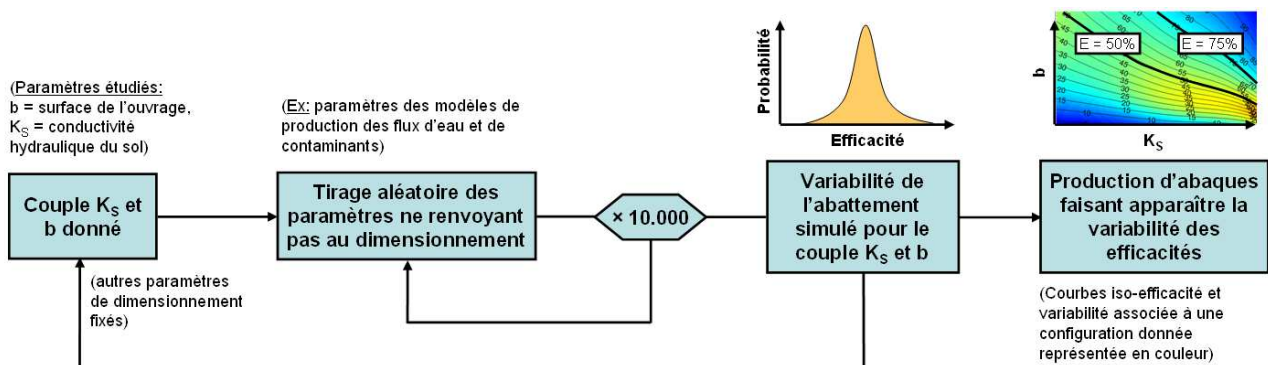


Figure 2. Démarche adoptée pour la construction d'abaques faisant apparaître l'efficacité E et sa variabilité en fonction de deux paramètres de dimensionnement à partir d'une approximation de la chaîne de modélisation développée dans le cadre de cette action.

Cette approche n'offrant qu'une vision partielle de l'incidence de la conception des techniques alternatives (puisque ne portant que sur les abattements calculés pour des périodes longues), une analyse plus approfondie du fonctionnement hydrologique des dispositifs de gestion à la source des eaux pluviales (reposant cette fois-ci sur une chronique de précipitations de 10 ans en région Ile-de-France) a également été réalisée à partir de la chaîne de modélisation, pour un nombre plus réduit de scénarios de dimensionnement, en s'intéressant notamment au niveau de sollicitation du volume de stockage (fréquence de mise en eau de l'ouvrage, temps de vidange...) et du sol dans l'ouvrage (évolution des profils teneurs en eau dans le sol).

RESULTATS

4. Synthèse sur les pratiques de gestion des eaux pluviales

L'analyse des pratiques actuelles de gestion des eaux pluviales a en premier lieu permis de mettre en évidence une certaine hétérogénéité quant à la traduction de l'objectif de maîtrise à la source des flux de polluants dans les critères de gestion ou les recommandations à destination des aménageurs. Quatre approches différentes ont ainsi été identifiées :

- Les stratégies de « régulation des débits », essentiellement destinées à la maîtrise des pluies exceptionnelles, ne supposant qu'un stockage temporaire des volumes capturés avant une restitution vers l'aval à débit limité (inférieur une valeur de consigne Q_{MAX})

- La définition d'un volume « à traiter », qui, à l'inverse des approches de régulation, intègre explicitement l'objectif de maîtrise des flux de polluants
- Les critères de « réduction des volumes » imposant qu'une fraction des volumes capturés à l'amont ne soit pas redirigée vers l'aval mais plutôt infiltrée ou évapotranspirée
- La définition d'objectifs non-hydrologiques, directement formulés en termes de maîtrise des flux de polluants (ex : abattement d'un certain pourcentage des masses annuelles de polluants) mais n'établissant aucun lien avec le fonctionnement hydrologique ou la conception des techniques alternatives

Parmi ces stratégies, celles ne supposant que le stockage temporaire ou le traitement des volumes ruisselés avant leur restitution vers l'aval n'apparaissent pas les plus adaptées à une contamination modérées des eaux pluviales urbaines (telle qu'observée à l'amont) et les approches de « réduction des volumes », établissant de façon explicite un lien entre abattement des pluies courantes et maîtrise des flux de polluants, semblent donc au regard des connaissances actuelles préférables à l'échelle amont. Indépendamment de leur nature, ces critères ne sont cependant justifiés que de façon assez sommaire et peu d'éléments scientifiques permettent réellement d'appuyer leur définition. En outre, l'analyse conduit plus généralement à s'interroger sur la prise en compte de ces critères par les aménageurs en absence d'outils adaptés permettant de s'assurer qu'un scénario de conception donné s'avère bien compatible avec les objectifs de gestion fournis dans les guides techniques ou les document réglementaires.

Cette analyse des pratiques de gestion des eaux pluviales urbaines, également consacrée à la conception des techniques alternatives, a par ailleurs permis d'identifier un certain nombre de contraintes liées à leur fonctionnement ou leur intégration en milieu urbain, dont la prise en compte semble indispensable pour orienter la gestion des eaux pluviales vers des solutions permettant de maîtriser de manière non-seulement efficace mais aussi réaliste les rejets de contaminants vers les milieux récepteurs.

5. Modélisation de la dynamique d'émission des contaminants au niveau des surfaces urbaines

Dans le cas des MES, le pouvoir prédictif des formules usuelles d'accumulation-lessivage s'est de manière générale avéré très limité en raison de leur incapacité à rendre compte, pour des périodes longues, de la complexité des processus conditionnant la variabilité des masses de polluants accumulées par temps sec à la surface des chaussées. Ces modèles supposent en effet que les émissions de MES sont le résultat du lessivage par temps de pluie d'un stock de sédiment qui serait uniquement fonction de la durée de temps sec précédent l'évènement pluvieux. En réalité, de nombreux facteurs (circulation routière, vent, travaux...) sont susceptibles d'influencer cette accumulation, qui, à l'échelle du tronçon de voirie, devrait probablement être envisagée comme un processus erratique. Néanmoins, les médiocres performances obtenues pour des applications événementielles ou pour des périodes courtes de précipitations indiquent que le faible pouvoir prédictif des modèles n'est pas uniquement expliqué par le caractère imprévisible de l'accumulation. Les fonctions usuelles de lessivage pourraient donc également se révéler peu adaptées à la description de la variabilité temporelle des concentrations. Les résultats indiquent toutefois que la forte incertitude sur les concentrations simulées pourrait n'avoir qu'une incidence limitée pour l'évaluation des techniques alternatives et permettent donc d'envisager une application de ces modèles pour la production de chroniques réalistes de concentrations en amont des ouvrages de gestion.

Dans le cas du zinc, une évolution très similaire des concentrations a pu être observée d'un évènement pluvieux ou d'une expérience à l'autre, avec une forte diminution des niveaux de contamination avec les premiers millimètres de ruissellement, suivie d'une stabilisation autour d'une concentration approximativement constante. L'influence de la durée de temps sec précédent un évènement pluvieux est apparue nettement plus marquée que pour les MES lessivées sur les chaussées et une reformulation des modèles usuels d'accumulation-lessivage a par conséquent pu être proposée pour simuler la dynamique d'émission du zinc dissous. En dépit de fortes incertitudes sur les concentrations simulées, ce modèle permet de reproduire de manière assez satisfaisante la dynamique globale d'émission du zinc au niveau d'éléments de toiture en zinc et semble donc bien adapté pour la modélisation, sur des périodes longues, de chroniques réalistes de concentration en amont des techniques alternatives.

6. Résultats sur la modélisation des pertes hydrologiques

Le schéma de modélisation des pertes par infiltration et évapotranspiration développé dans le cadre de cette action offre, en comparaison des approches classiquement utilisées en hydrologie urbaine, un bon compromis entre simplicité et fidélité de la représentation des processus hydrologiques, en permettant notamment de simuler l'évolution des teneurs en eau dans le sol, sous l'effet des forces gravitaires et matricielles ou de l'évapotranspiration, afin de mieux rendre compte de la variabilité des flux d'infiltration dans les ouvrages de gestion. Les résultats obtenus indiquent de manière générale que le modèle permet de reproduire avec une précision très satisfaisante les flux infiltrés dans les ouvrages de gestion et, dans une certaine mesure, de décrire l'évolution du profil de teneur en eau dans le sol.

L'intérêt du modèle pour l'analyse du fonctionnement des techniques alternatives, a pu être illustré en comparant les efficacités simulées à partir de ce dernier à celles obtenues pour des représentations simplifiées de l'infiltration, en considérant un grand nombre de scénarios de dimensionnement des ouvrages de gestion. La distribution temporelle des rejets est globalement apparue assez sensible au mode de description des pertes par infiltration. En revanche, des résultats très satisfaisants pourraient vraisemblablement être obtenus dans le cas d'applications « simples » telles que l'estimation des volumes abattus sur des périodes longues dans les dispositifs de gestion en négligeant la variabilité temporelle des flux d'infiltration, en particulier pour les ouvrages intégrant un volume mort de plus d'une dizaine de centimètres (h_p sur la figure 1).

7. Incidence du fonctionnement hydrologique des techniques alternatives sur les flux de contaminants

L'analyse de sensibilité a permis de préciser l'incidence de l'ensemble des paramètres d'entrée sur les sorties de la chaîne de modélisation et d'identifier les composantes du système « surface urbaine + ouvrage » susceptibles d'introduire des incertitudes sur les efficacités simulées. L'étude plus spécifique de la conception des techniques alternatives, avec la construction d'abaques et l'analyse approfondie de certains scénarios de dimensionnement, a quant-à-elle permis d'identifier les solutions les plus adaptées à une maîtrise des flux de polluants et de mieux comprendre la façon dont le fonctionnement hydrologique des ouvrages conditionne la valeur et la variabilité des efficacités simulées.

Sources d'incertitude sur les efficacités simulées. Une influence assez importante des paramètres des modèles de production des contaminants sur les efficacités simulées ainsi que des différences significatives entre les abattements en volumes de ruissellement et les abattements en masse de polluant (jusqu'à 30% pour les abattements totaux pour une période de pluie de 4 ans) ont dans un premier temps pu être observées. Ces résultats suggèrent que la prise en compte de la variabilité temporelle des concentrations dans le ruissellement est nécessaire pour comprendre l'incidence des techniques alternatives sur les rejets de contaminants. Toutefois, les abattements en masse s'avérant nettement plus variables que les abattements en volume (cf. figure 3) et demeurant pour l'essentiel des scénarios étudiés supérieur aux abattements volumiques, une estimation satisfaisante de l'efficacité des dispositifs de gestion à la source des eaux pluviales pourrait vraisemblablement être obtenue à partir d'approches strictement hydrologiques (en acceptant que cette dernière puisse dans certains cas être sous estimée).

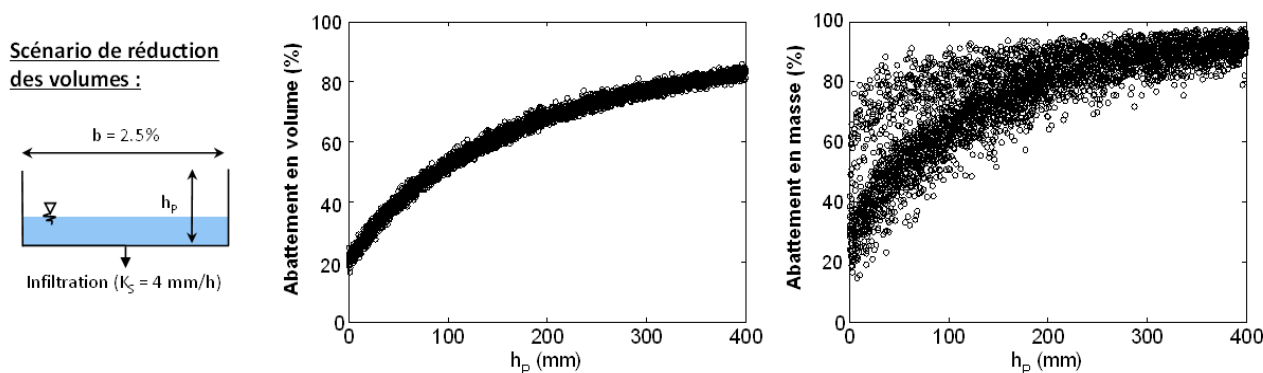


Figure 3. Variabilité des abattements en volume et en flux simulés pour différents scénarios de réduction des volumes (les paramètres de la chaîne de modélisation ne renvoyant pas directement au dimensionnement de l'ouvrage ainsi que h_p ont ici été tirés au hasard)

L'étude des différents scénarios de gestion des eaux pluviales a également permis de mettre en évidence la forte variabilité des efficacités simulées pour les ouvrages de régulation (correspondant à la configuration présentée figure 1), en particulier pour les faibles valeurs de volume mort h_p (voir figure 3). Les abattements se révèlent en effet très dépendants des caractéristiques du dispositif de régulation, qui conditionnent fortement la capacité à retenir puis infiltrer ou évapotranspirer les pluies courantes lorsque h_p est faible. Ainsi, si des niveaux d'efficacité satisfaisants peuvent être obtenus pour les lois de régulation les plus favorables, celles permettant d'atteindre rapidement le débit de consigne Q_{MAX} (cas de figure en pratique assez répandu) n'apparaissent en revanche pas pertinentes la maîtrise des flux de polluants car donnant lieu à un rejet quasi-systématique des pluies courantes vers l'aval.

Plus généralement, la variabilité des efficacités se rapportant à la distribution temporelle des rejets (abattements en volume ou en masse calculés pour une période de retour donnée) s'est avérée nettement plus importante que celle des abattements calculés pour des périodes longues de précipitations. Une analyse fine et à des échelles temporelles courtes du fonctionnement des techniques alternatives suppose donc probablement de s'interroger sur la nature et la paramétrisation des modèles utilisés. Les résultats obtenus permettent en revanche bien d'envisager une application de la chaîne de modélisation développée dans le cadre de cette action pour la production d'outil d'aide à la conception des techniques alternatives reliant les abattements simulés pour des périodes longues de précipitations à différents paramètres de dimensionnement.

Incidence de la conception des techniques alternatives sur la maîtrise des flux de contaminants. L'incidence de la conception des techniques alternatives a été évaluée en distinguant trois scénarios de gestion : les scénarios (1) de réduction des volumes, (2) de régulation de débits sans volume mort et (3) de régulation des débits avec volume mort (cf. figure 4). Pour chacun de ces scénarios l'effet de la surface relative de l'ouvrage b , de la capacité d'infiltration du sol K_s , de la profondeur de volume mort h_p et du débit de consigne Q_{MAX} a été analysé (pour les scénarios de régulation des débits, le volume de stockage supplémentaire au dessus du volume mort a été calculé à partir de b , Q_{MAX} et K_s en utilisant la « méthode des pluies », et correspond au volume nécessaire à la gestion de la pluie décennale).

Pour les stratégies de réduction des volumes, les résultats indiquent qu'une réduction importante (supérieure à 75%) des rejets de contaminants à l'échelle annuelle pourrait être obtenue dans de nombreuses situations, y compris pour des faibles valeurs de volume mort h_p ou dans le cas de sols assez peu perméables ($K_s \geq 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$), dès lors qu'une surface d'infiltration suffisante est considérée (de l'ordre de 5 à 10% de la surface drainée). Des résultats similaires sont obtenus pour les scénarios de régulation des débits avec volume mort. A valeur de h_p équivalente, la présence d'un volume de stockage supplémentaire au dessus du niveau du régulateur se traduit toutefois par une augmentation de l'efficacité de l'ouvrage d'autant plus importante que la valeur du débit de fuite retenue est faible. Pour les fortes valeurs de débits de fuite (de l'ordre de 10 l/s/ha) des niveaux d'abattements assez comparables à ceux calculés pour les

scénarios de réduction des volumes sont ainsi simulés (cf. figure 4). A l'inverse, la diminution du débit de consigne donne lieu à une vidange plus lente de l'ouvrage au dessus du niveau du régulateur et favorise donc les pertes par infiltration ou évapotranspiration.

La présence d'un volume mort apparaît comme un élément déterminant de l'efficacité des ouvrages de régulation. Ainsi, si des niveaux satisfaisants de réduction des flux de polluants peuvent potentiellement être atteints avec $h_p = 0$, la variabilité des efficacités simulées pour les scénarios de régulation sans volume mort souligne clairement la difficulté à garantir un abattement donné pour ce mode de conception (cf. figure 4). Le recours à des dispositifs assurant uniquement un objectif de régulation des débits n'apparaît donc, à l'issu de ce travail, pas réellement souhaitable pour la maîtrise des flux de contaminants et la mise en place d'un volume mort semble nécessaire pour assurer conjointement les objectifs de gestion des pluies courantes et de contrôle des évènements exceptionnels.

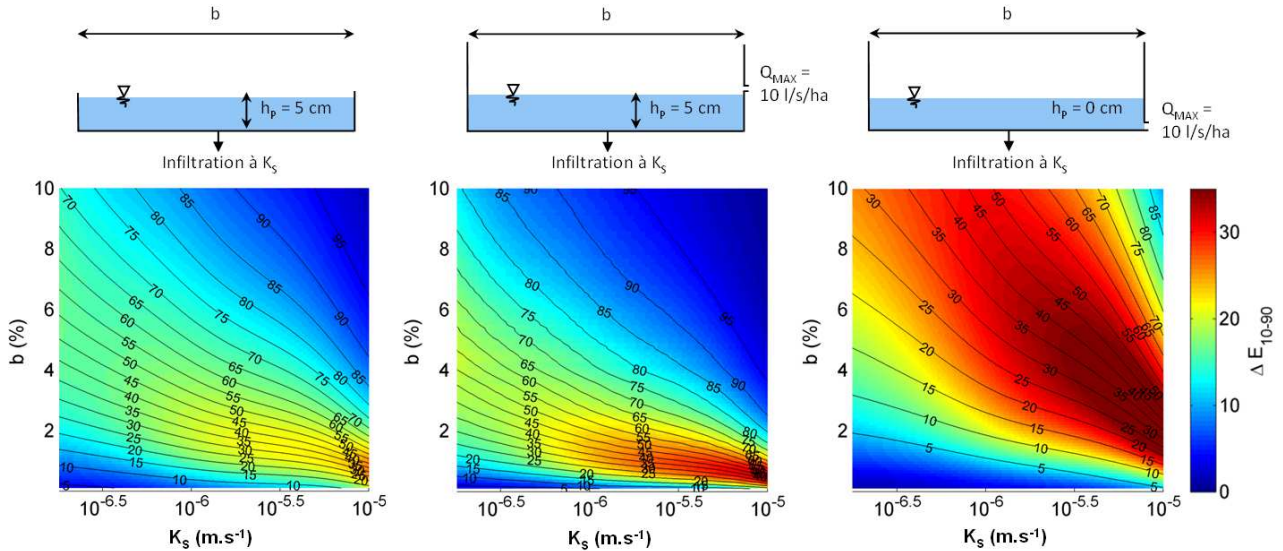


Figure 4. Exemple de résultats pour trois modes de gestion distincts. Les courbes noires donnent l'ensemble des configurations (couples b et K_s) correspondant à un niveau d'abattement donné (premier décile des efficacités simulées) et ΔE_{10-90} désigne l'écart entre le premier et le 9^{ème} décile des abattements simulés (traduit la variabilité des efficacités simulées)

Pour les scénarios de réduction des volumes comme pour ceux de régulation des débits (avec volume mort), des niveaux d'efficacités acceptables semblent enfin pouvoir être obtenus dans le cas de sols présentant des capacités d'infiltration limitées ($K_s \leq 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$). Une analyse plus approfondie du fonctionnement hydrologique des techniques alternatives a cependant permis de mettre en évidence des risques de dysfonctionnement liés à une sollicitation excessive de l'ouvrage, avec une saturation en profondeur du sol et le maintien en eau du volume de stockage sur des périodes relativement longues (cf. figure 5). Pour ce type de sol, le recours à des dispositifs peu profonds, présentant des surfaces d'infiltration ou d'évapotranspiration importantes devrait donc probablement être privilégié pour garantir une bonne intégration et un fonctionnement satisfaisant des techniques alternatives.

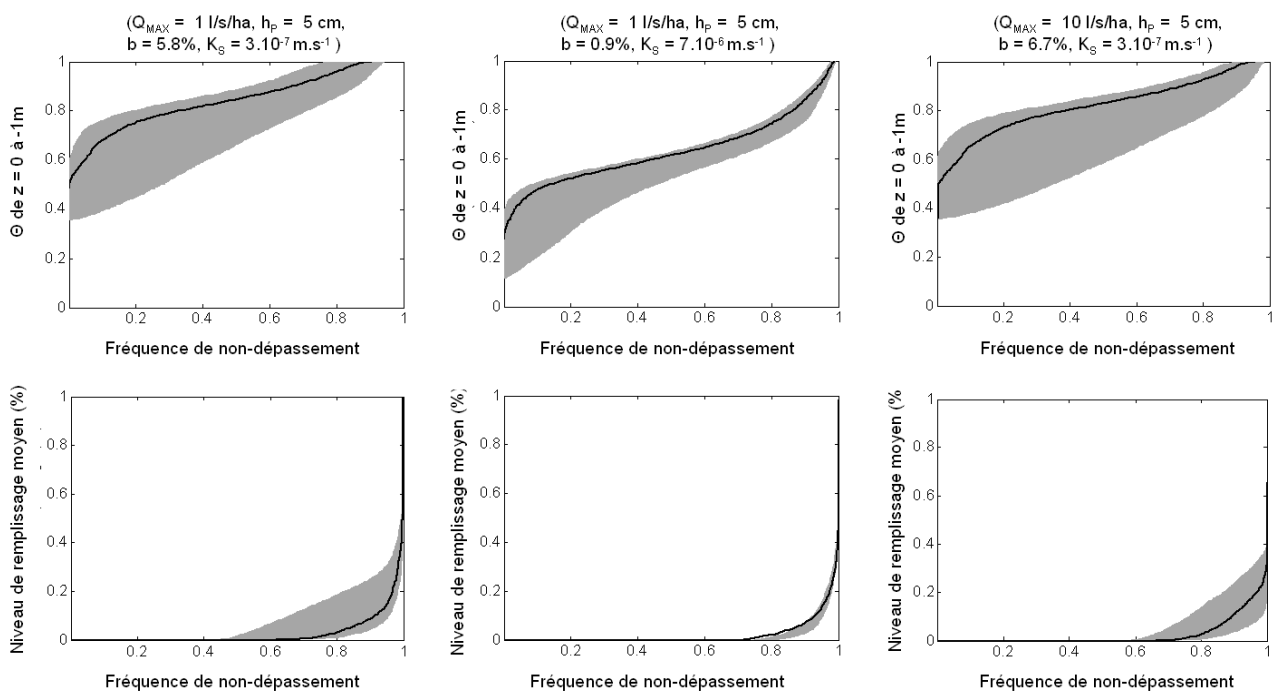


Figure 5. Fréquence de non-dépassement des teneurs en eau (relative) moyennes (sur 24h) sur une couche de sol de 1m à la surface de l'ouvrage et fréquence de non-dépassement des niveaux de remplissage moyens sur 24h pour 3 configurations correspondant à une efficacité de 75% (premier décile) (en gris : intervalle de confiance 10-90%)

CONCLUSIONS

Cette action a été consacrée à l'étude de la conception et du fonctionnement hydrologique des techniques alternatives, et de leur incidence sur les flux de polluants dirigés vers les réseaux ou les milieux récepteurs. L'étude des pratiques de gestion des eaux pluviales urbaines a dans un premier temps permis d'identifier différentes catégories de préconisations pour la maîtrise à la source de cette contamination. Les conséquences de la gestion hydrologique du ruissellement ont ensuite été analysées sur la base d'un travail de modélisation ayant notamment permis de préciser le lien entre la conception et l'efficacité des techniques alternatives pour la maîtrise des pluies courantes et des rejets de contaminants. Différents développements méthodologiques se sont avérés nécessaires pour la description des pertes hydrologiques (infiltration et évapotranspiration) dans les dispositifs de gestion à la source des eaux pluviales et la modélisation des émissions de polluants au niveau des surfaces urbaines. Plusieurs recommandations ont enfin pu être formulées pour la gestion à la source du ruissellement, et le travail de modélisation permet en particulier d'envisager la production d'outils d'aide à la conception, reliant l'efficacité des techniques alternatives à quelques paramètres de dimensionnement. Les principales conclusions de cette action sont :

Pour la définition des critères de gestion : Le dimensionnement des techniques alternatives repose fréquemment sur des critères de gestion formulés en des termes hydrologiques assez généraux et n'intégrant pas de manière explicite l'objectif de maîtrise des flux de contaminants. La difficulté que soulève leur prise en compte pour le dimensionnement des ouvrages de gestion conduit à s'interroger sur leur pertinence dans un contexte opérationnel. Ces critères ne traduisent par ailleurs pas nécessairement de façon optimale l'objectif réduction des rejets de contaminants. Les réglementations reposant sur la définition un débit de fuite admissible vers les réseaux, très répandues en France, n'apparaissent par exemple pas réellement pertinentes : en effet, si le recours à de faibles valeurs de ce débit de consigne peut favoriser l'abattement des pluies courantes et des contaminants associés, les résultats de modélisation indiquent qu'il serait préférable d'agir sur d'autres paramètres de dimensionnement pour contrôler l'efficacité des solutions mises en œuvre. La mise à la disposition des aménageurs d'outils permettant de relier plus directement l'efficacité des techniques alternatives à quelques paramètres de conception devrait donc probablement être envisagée.

Pour le choix d'un mode de gestion du ruissellement : Deux modes de gestion hydrologique ont été comparés dans le cadre de ce travail : (1) les stratégies de réduction des volumes et (2) celles de régulation des débits. La capacité des techniques alternatives à limiter les rejets de contaminants vers les réseaux ou les milieux récepteurs étant à l'échelle annuelle très dépendante de leur comportement vis-à-vis des pluies courantes, les solutions destinées à retenir puis infiltrer ou évapotranspirer une fraction des volumes ruisselés devraient probablement être privilégiées pour une maîtrise à la source de la contamination des eaux pluviales urbaines. Les ouvrages dimensionnés pour le seul objectif de maîtrise des débits de pointes n'apparaissent en particulier pas réellement pertinents du fait de la difficulté à garantir un niveau d'efficacité donné pour ce type de solution. Dans le cas où les techniques alternatives seraient destinées à assurer conjointement la régulation des débits au cours des événements exceptionnels et la maîtrise des flux de contaminants, le recours à des ouvrages intégrant un volume mort, même réduit, semble donc préférable.

Pour la conception des techniques alternatives : Des dispositifs de dimensions assez modestes permettraient vraisemblablement de limiter efficacement (pour le climat considéré) les rejets de polluants vers les réseaux ou les milieux récepteurs dès lors que la capacité d'infiltration du sol est supérieure à 10^{-6} m.s⁻¹. Pour les sols moins propices à l'infiltration (conductivité hydraulique de l'ordre de 10^{-6} m.s⁻¹ ou inférieures), le recours à des dispositifs peu profonds (pas plus d'une dizaine de centimètres) et présentant des surfaces plus importantes (typiquement de l'ordre de 10% de la surface du bassin versant d'apport) semble nécessaire pour garantir des niveaux satisfaisant d'abattement des flux de contaminants tout en évitant un maintien en eau du volume de stockage sur de trop longues périodes. Plus généralement, la mise en œuvre de solution « diffuses » est probablement préférable à une concentration des volumes ruisselés afin de limiter la sollicitation hydraulique des techniques alternatives.

Pour la production d'outils d'aide à la conception : Les abaques développés dans le cadre de cette action, permettant de relier l'efficacité des techniques alternatives à quelques paramètres de conception, présentent un intérêt pratique certain et pourraient aisément être adaptés (contexte météorologique différents de celui de la région ile de France, passage à une feuille de calcul ou à un modèle fonctionnel...) de manière à compléter voire remplacer certains critères de gestion du ruissellement. Si de tels outils faciliteraient probablement la prise en compte de l'objectif de réduction des rejets de polluants, les résultats précédents indiquent toutefois qu'une approche de dimensionnement reposant sur le seul critère de réduction des flux de contaminant pourrait ne pas toujours s'avérer suffisante puisque ne permettant pas d'identifier les configurations donnant lieu à une sollicitation excessive du sol (maintien en eau sur des périodes longues et saturation en profondeur du sol sous l'ouvrage). L'introduction de critères de « bon fonctionnement hydrologique » semble donc souhaitable pour mieux orienter la conception des techniques alternatives.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bressy, A., 2010. Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines. Effets de différents modes de gestion des eaux pluviales. Thèse de Doctorat. Université Paris Est.
- Dotto, C.B.S., Kleidorfer, M., Deletic, A., Rauch, W., McCarthy, D.T., Fletcher, T.D., 2011. Performance and sensitivity analysis of stormwater models using a Bayesian approach and long-term high resolution data. Environmental Modelling and Software 26, 1225–1239.

Kanso, A., 2004. Evaluation des modèles de calcul des flux polluants des rejets urbains par temps de pluie: Apport de l'approche bayésienne. Thèse de Doctorat. Ecole des Ponts Paristech.

Milly, P.C.D., 1986. An event-based simulation model of moisture and energy fluxes at a bare soil surface. Water Resources Research. 22(12), 1680-1692

Sage, J., 2016. Concevoir et optimiser la gestion hydrologique du ruissellement pour une maîtrise à la source de la contamination des eaux pluviales urbaines. Thèse de Doctorat. Université Paris Est.

CONTACTS

Jérémie Sage, jeremie.sage@cerema.fr

Emmanuel Berthier, emmanuel.berthier@cerema.fr

Marie-Christine Gromaire, gromaire@leesu.enpc.fr