

Modélisation des stratégies de régulation des débits et d'abattement des volumes ruisselés pour la maîtrise à la source des flux de contaminants

■ J. SAGE¹, E. BERTHIER², M.-C. GROMAIRE¹

Mots-clés : chaussées, dynamique, lessivage, polluants, techniques alternatives

Keywords: BMP, dynamics, pollutants, source-control, urban streets, wash-off

Introduction

Au cours des dernières décennies, les limites des solutions « conventionnelles » de traitement et d'évacuation des eaux pluviales urbaines ont rendu nécessaire l'émergence de nouvelles logiques d'aménagement supposant une gestion décentralisée du ruissellement pour en limiter/réguler le rejet vers les réseaux d'assainissement ou les milieux superficiels. Le contrôle à la source s'est donc progressivement imposé, tant dans les milieux opérationnels que scientifiques, comme un élément incontournable pour une gestion à moindre impact des eaux pluviales urbaines (*low impact development* ou *sustainable urban drainage systems* dans les pays anglo-saxons) [AHIA-BLAME *et al.*, 2012].

Néanmoins, bien que l'adoption de ces solutions de gestion « plus durables » ou « à moindre impact » du ruissellement soit aujourd'hui fortement encouragée par les pouvoirs publics et, plus généralement, considérée comme une condition nécessaire à la maîtrise des flux de polluants dirigés vers les milieux récepteurs, les critères de conception des solutions de gestion des eaux pluviales donnés aux aménageurs demeurent assez variables d'un pays à l'autre et souvent peu précis. Ainsi, tandis que la définition d'objectifs d'interception volumiques est assez fréquente outre-Atlantique [MDE, 2009 ; MPCA, 2005 ; PDEP, 2006], la donnée d'un débit maximal

admissible vers les réseaux ou les milieux récepteurs demeure souvent, en France, l'unique critère de gestion des eaux pluviales fourni aux aménageurs [PETRUCCI, 2012]. Si de récentes études semblent indiquer que ce type de critère pourrait ne pas toujours être le mieux adapté à la maîtrise à la source des flux d'eau et de contaminants [BRESSY, 2010 ; PETRUCCI *et al.*, 2013], très peu d'éléments permettent toutefois de réellement quantifier leur effet en matière de réduction des rejets de polluants.

Le travail suivant vise donc à préciser, en se basant sur une modélisation couplée des flux d'eau et de polluants, l'incidence des stratégies d'abattement des volumes ruisselés et de régulation des débits, lorsque le ruissellement est géré à l'échelle de la parcelle dans des ouvrages perméables et végétalisés, en considérant différents types de surfaces urbaines, de dynamiques d'émission des polluants, ou de configurations d'ouvrage (dimensions, caractéristiques des sols...).

1. Méthodologie

1.1. Contexte et principes généraux

Comme indiqué précédemment, la finalité de la démarche proposée est l'évaluation de différentes stratégies de gestion à la source des eaux pluviales, en distinguant les approches de régulation des débits et d'abattement des volumes ruisselés. Cette évaluation reposera alors principalement sur l'analyse de la distribution des masses événementielles rejetées vers les milieux récepteurs et des abattements simulés sur des périodes longues pour les différentes solutions étudiées.

¹ Université Paris-Est – LEESU – UMR MA 102, ENPC – 77455 Champs-sur-Marne.

² Cerema – Direction territoriale Île-de-France – 12, rue Teisserenc-de-Bort – 78180 Trappes.

L'efficacité des techniques alternatives étant généralement assez variable d'un événement à l'autre, l'analyse des différentes stratégies de gestion des eaux pluviales ne saurait être satisfaisante sans une simulation de leur fonctionnement pour une gamme représentative d'événements pluvieux [WILD et DAVIS, 2009]. De plus, l'abattement (en masse ou en volume) obtenu à l'échelle d'un événement est fortement conditionné par l'état hydrique de l'ouvrage en début de pluie, et donc par la façon dont se succèdent les événements pluvieux [HATT *et al.*, 2009]. L'évaluation des approches de régulation des débits et d'abattement des volumes ruisselés repose donc ici sur une modélisation en continu, pour une chronique de pluie suffisamment longue, du fonctionnement des techniques alternatives et des flux de polluants dirigés vers les milieux superficiels.

Différentes études ont par ailleurs mis en évidence une importante variabilité temporelle des concentrations dans les eaux de ruissellement. Généralement, les caractéristiques des pluies permettent d'expliquer au moins partiellement ces fluctuations des concentrations d'un événement à l'autre ou au cours d'une pluie. Ainsi, les concentrations de matières en suspension (MES) lessivées au niveau des surfaces urbaines sont, par exemple, supposées dépendre directement de l'intensité des précipitations [EGODAWATTA *et al.*, 2007 ; GNECCO *et al.*, 2005]. De la même manière, plusieurs résultats semblent indiquer que les durées de temps sec entre les pluies conditionnent en partie les concentrations métalliques observées dans les eaux de ruissellement [GROMAIRE *et al.*, 2011 ; HE *et al.*, 2001]. À l'échelle intra-événementielle, une forte

décroissance des concentrations en métaux dissous issus des surfaces métalliques est généralement observée en début de pluie [FÖRSTER, 1996 ; SCHRIEWER *et al.*, 2008] tandis que ce phénomène n'est pas nécessairement vérifié dans le cas de polluants particulaires mis en suspension sur les chaussées [DELETIC, 1998]. S'il est souvent considéré qu'il devrait être tenu compte de cette contamination plus importante des premiers millimètres de ruissellement pour la conception des techniques alternatives, peu d'études ont en réalité clairement mis en évidence l'incidence de la dynamique d'émission des polluants sur l'efficacité des techniques alternatives.

1.2. Principe de la chaîne de modélisation

Des modèles couplés de production des flux d'eau et de polluants ont été développés ou adaptés de travaux antérieurs afin de simuler l'effet des stratégies de régulation des débits et d'abattement des volumes ruisselés pour le zinc issu de toitures métalliques et pour les MES des chaussées urbaines (ces deux situations correspondant à des dynamiques d'émission différentes).

Le comportement hydrologique des toitures et des voiries est bien documenté [RAGAB *et al.*, 2003a, 2003b ; RAMIER, 2004]. Des modèles relativement simples peuvent être utilisés avec une paramétrisation reposant principalement sur des résultats de la littérature (coefficients de ruissellements calculés sur des périodes longues, ou mesures directes des pertes au ruissellement). Les processus associés aux émissions de contaminants par temps de pluie sont en revanche nettement plus complexes et encore mal

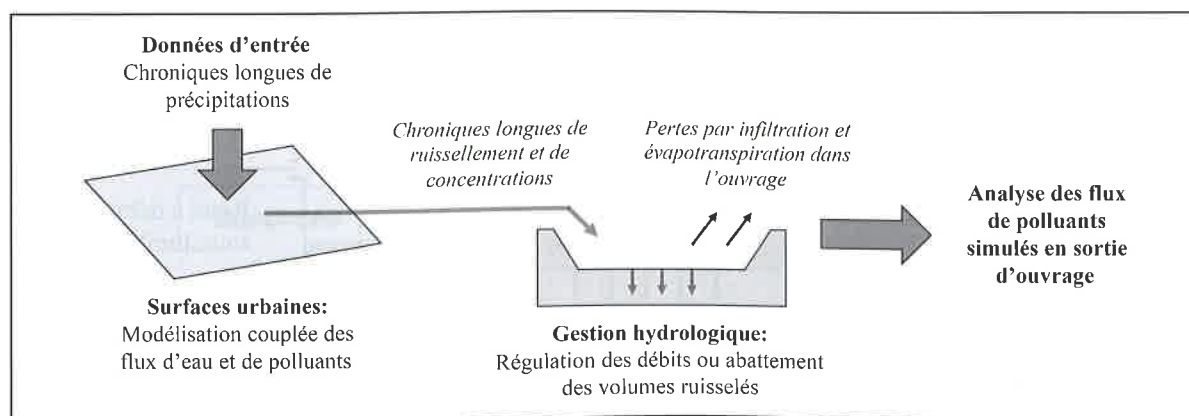


Figure 1. Approche proposée pour l'évaluation des stratégies de régulation des débits et d'abattement des volumes ruisselés

connus. Différents modèles de la littérature, préalablement calés et validés à partir de données expérimentales, sont donc employés dans cette étude.

Les volumes de ruissellement et les flux de polluants associés générés pour une chronique de 15 années de pluie en région Île-de-France sont alors utilisés comme données d'entrée d'un modèle conceptuel de technique alternative végétalisée et perméable (de type noue, jardin de pluie, bassin enherbé...) pour lequel des stratégies de régulation des débits ou d'abattement des volumes ruisselés sont simulées et évaluées en se basant sur les flux de polluants calculés en sortie d'ouvrage (figure 1).

1.3. Représentation de la gestion hydrologique

Une représentation très schématique de l'ouvrage a été ici retenue. Ce dernier est supposé rectangulaire, à berges verticales (figure 2) et peut être décrit par les paramètres suivants : sa taille b (ratio entre surface de l'ouvrage et surface d'apport), une hauteur d'eau h_p (exprimée en mm de ruissellement sur la surface d'apport) correspondant à un volume d'abattement uniquement vidangé par infiltration ou évapotranspiration, et, dans le cas de la régulation des débits, h_{max} , la capacité maximale de stockage de l'ouvrage (également exprimée en mm de ruissellement sur la surface d'apport) et la loi de vidange $Q(h)$. Le rejet d'eau est donc supposé se produire par surverse de l'ouvrage ou à travers le dispositif de régulation des débits. Les flux de polluants sortant de l'ouvrage sont alors calculés en considérant ce

dernier comme un réacteur parfait (mélange instantané des volumes entrants et stockés).

L'abattement des flux de polluants est ici uniquement expliqué par les volumes infiltrés ou évapotranspirés (les contaminants associés aux volumes perdus par évapotranspiration étant supposés se déposer au fond de l'ouvrage ou être filtrés/adsorbés par le sol). L'efficacité de l'ouvrage dépendra donc directement de son fonctionnement hydrologique ; une analyse de sensibilité approfondie sera par conséquent nécessaire pour préciser l'incidence des différentes hypothèses de modélisation. On pourra, par exemple, chercher à comparer plusieurs modèles d'infiltration afin de déterminer si une description simplifiée du sol peut ou non fournir une estimation raisonnable des volumes infiltrés dans l'ouvrage.

Il semble par ailleurs important de remarquer que la modélisation de l'ouvrage est ici strictement hydrologique et ne permet pas de rendre compte de processus spécifiques tels que la décantation ou l'adsorption. S'il est possible qu'une telle hypothèse conduise à sous-estimer l'efficacité des solutions de gestion des eaux pluviales, on pourra cependant noter que la gestion à la source est généralement envisagée comme une méthode reposant plus sur le rétablissement des conditions hydrologiques naturelles que sur des processus spécifiques de « dépollution » [AHIABLAUME *et al.*, 2012]. Par ailleurs, des travaux récents semblent également indiquer que les techniques alternatives n'ont parfois (et en particulier à l'amont) qu'un effet limité sur les concentrations en polluants

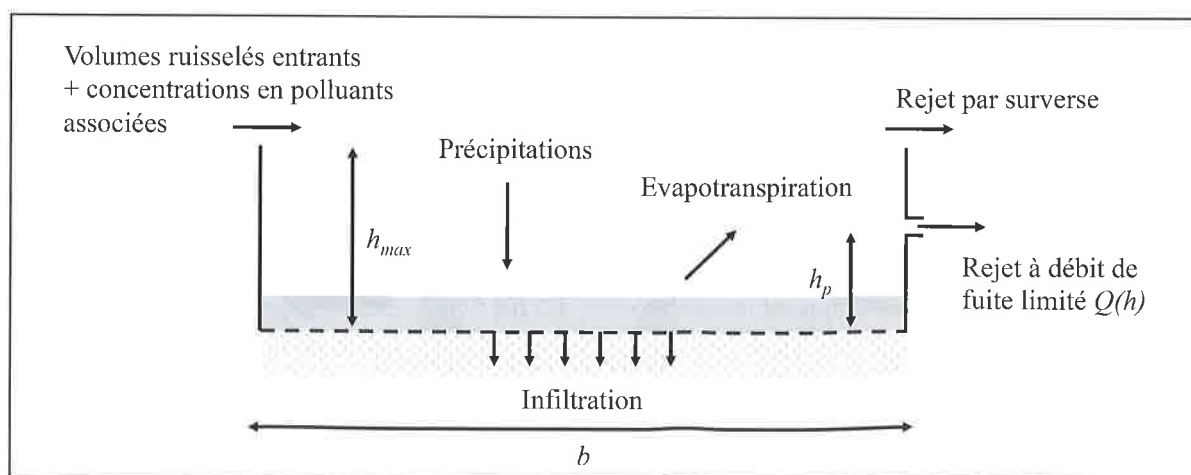


Figure 2. Modèle conceptuel adopté pour la simulation des différentes stratégies de gestion des eaux pluviales

[DAVIS *et al.*, 2009 ; TROWSDALE et SIMCOCK, 2011] : ainsi, l'abattement des flux de polluants pourrait donc être en grande partie expliqué par l'abattement des volumes ruisselés [BRESSY, 2010].

1.4. Cas d'étude : les chaussées du Marais à Paris

Afin d'illustrer la méthodologie proposée, des chroniques longues de ruissellement et de concentrations en MES sont ici simulées pour plusieurs chaussées du bassin versant du Marais (à Paris) en se basant notamment sur les résultats de KANSO [2004]. L'effet des stratégies d'abattement des volumes ruisselés et de régulation des débits est ainsi évalué pour différentes dynamiques d'émission des polluants au niveau des chaussées, en retenant dans un premier temps une approche simplifiée pour la modélisation des solutions de gestions des eaux pluviales mises en œuvre.

1.4.1. Modélisation hydrologique des chaussées

Les pertes au ruissellement sur les chaussées sont ici modélisées par un simple volume d'interception vidangé par évaporation (calculée à partir de données fournies par Météo-France) et infiltration (bien que celle-ci soit en pratique très limitée). En se basant sur les résultats de la littérature [LEMONSU *et al.*, 2007 ; RAGAB *et al.*, 2003b ; RAMIER, 2004], le volume d'interception et la vitesse d'infiltration sont respectivement pris égales à 1 mm et 10⁻⁸ m/s. Le coefficient de ruissellement moyen obtenu pour les 15 années de simulation est alors de 0,71, ce qui est comparable aux valeurs mesurées par RAMIER [2004] ou RAGAB et coll. [2003b].

1.4.2. Modélisation des flux de MES

Dans sa thèse, KANSO [2004] a évalué le pouvoir prédictif des modèles usuels d'accumulation-lessivage des MES en se basant sur des mesures effectuées au niveau de six chaussées du Marais à Paris sur une période de 16 mois [KANSO, 2004]. Des résultats satisfaisants ont été obtenus pour cinq de ces chaussées.

Ces modèles sont donc employés, avec les valeurs de paramètres calés par Kanso, pour simuler les fluctuations des concentrations en MES dans les eaux de ruissellement au cours des pluies. La durée de temps sec séparant les événements pluvieux n'est apparue avoir d'influence sur les flux de MES mesurés que pour une seule des cinq chaussées étudiées. Deux modèles d'accumulation ont donc été proposés, le premier supposant que le stock de polluants en surface augmente avec la durée de temps sec (chaussée 3), et le second, que la reconstitution de ce stock en fin de pluie est instantanée (chaussées 1, 2 4 et 5). Le modèle de lessivage retenu est quant à lui le même pour les cinq chaussées (mais avec des valeurs de paramètres propres à chacune d'entre elles, traduisant ainsi les différences de dynamique d'émission observées d'un site à l'autre).

Accumulation :

$$M_{DISP}(t_0) = M_0 \quad \text{ou} \quad M_{DISP}(t_0) = M_0 \cdot (1 - e^{-K_{acc} DTS})$$

(chaussées 1,2, 4 et 5) (chaussée 3 uniquement)

Lessivage :

$$M_{MES}(t) = M_{DISP}(t) \cdot (1 - e^{-W \cdot i(t) \omega dt})$$

Avec : $M_{MES}(t)$ la masse de MES lessivée entre les dates t et $t+dt$ (g/m²) ;

$M_{DISP}(t)$ le stock disponible à la date t (g/m²) et

$M_{DISP}(t+dt) = M_{DISP}(t) - M_{MES}(t)$;

$M_{DISP}(t_0)$ le stock disponible en début d'événement (g/m²) (les événements étant identifiés en retenant une durée minimale de temps sec de 24 h entre les pluies) ;
DTS la durée de temps sec (en jours) précédant l'événement pluvieux ;

$i(t)$ l'intensité précipitée (mm/h) ;

M_0, W, ω, K_{acc} des paramètres des modèles (tableau I).

1.4.3. Modélisation de la gestion hydrologique

Une description simplifiée des pertes dans l'ouvrage est dans un premier temps adoptée en faisant l'hypothèse

	Chaussée 1	Chaussée 2	Chaussée 3	Chaussée 4	Chaussée 5
W	3,7.10 ⁻²	3,6.10 ⁻¹	4,2.10 ⁻²	1,0.10 ⁻¹	2,7.10 ⁻²
ω	1,3	0,9	1,3	1,0	1,4
M ₀ (g/m ²)	2,0	0,5	4,5	2,2	1,9
K _{acc} (j ⁻¹)	/	/	0,1	/	/

Tableau I. Paramètres des modèles d'accumulation et lessivage

d'une infiltration à vitesse constante (K_{TA}) et d'une perte initiale en surface de 5 mm au fond de l'ouvrage [RODRIGUEZ *et al.*, 2008]. On supposera par ailleurs que la régulation des débits est effectuée à travers un simple orifice circulaire ; le débit rejeté $Q(h)$ peut alors être calculé à partir de la loi suivante :

$$Q(h) = A\sqrt{h} \quad \text{et} \quad \frac{A = Q(h_{max})}{\sqrt{h_{max}}} \quad (1)$$

Avec : $Q(h)$ le débit de rejet pour une hauteur d'eau (normalisée) h dans l'ouvrage (L/s/ha) ;

h la hauteur d'eau (normalisée) dans l'ouvrage (mm) ;

A un coefficient choisi tel que la condition (1) soit satisfaite (ce qui revient à considérer que la taille de l'orifice est choisie de sorte que le débit de fuite ne dépasse pas le débit de consigne $Q(h_{max})$ lorsque l'ouvrage est plein.

2. Résultats et discussion

2.1. Approches volumiques

Une gestion des eaux pluviales basée sur des critères volumiques est dans un premier temps simulée pour des objectifs d'abattement ($h_p = h_{max}$) de 2,5 à 20 mm et différentes vitesses d'infiltration. La taille de l'ouvrage est ici fixée à 2,5 % de la surface de chaussée drainée, ce qui correspond à une valeur relativement faible pour des solutions de gestion à la source telles que des jardins de pluie [WILD et DAVIS, 2009 ; ZHANG et GUO, 2012]. La figure 3 fait apparaître la moyenne des abattements calculés (pour les 15 années de précipitation) sur les cinq chaussées pour différentes

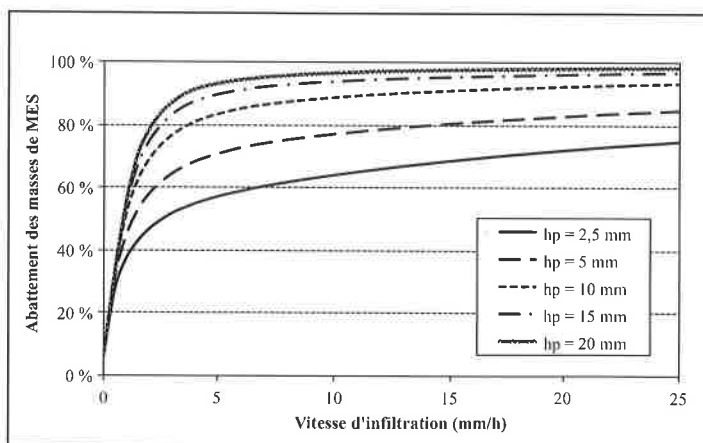


Figure 3. Abattements moyens simulés pour différents objectifs d'abattement volumiques (ratio surface d'ouvrage : surface d'apport $b = 2,5 \%$)

configurations d'ouvrage en matière de vitesse d'infiltration et de hauteur d'eau ciblée.

Ces résultats semblent indiquer que l'abattement de hauteurs d'eau relativement modestes pourrait donner lieu, dans la plupart des situations, à une réduction significative des rejets de polluants vers les milieux. Ainsi, un abattement de 60 % des flux de MES est, par exemple, aisément obtenu (y compris pour de faibles vitesses d'infiltration) en ciblant des volumes de ruissellement de l'ordre de 5 mm. On notera par ailleurs que les abattements calculés correspondent au cas d'un ouvrage de petite taille ($b = 2,5 \%$). Cette performance pourrait donc être nettement améliorée en retenant une surface plus importante donnant lieu à des pertes par infiltration ou évapotranspiration plus élevées (figure 3).

2.2. Comparaison avec les stratégies de régulation

Afin de comparer de façon théorique la pertinence des critères de gestion volumiques à ceux de régulation des débits, les volumes d'ouvrage (h_{max}) et vitesses d'infiltration (K_{TA}) requises pour atteindre un abattement de 85 % des flux de MES (en moyenne sur les cinq chaussées) sont calculés pour chacune des deux approches. La régulation des débits est ici supposée être effectuée dans un ouvrage sans volume mort pour un débit de consigne de 1 L/s/ha. Les résultats obtenus sont fournis figure 4.

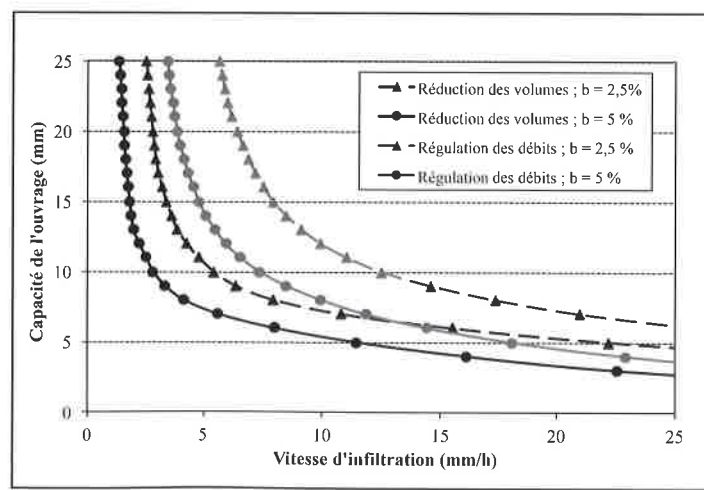


Figure 4. Caractéristiques de l'ouvrage requises pour atteindre 85 % d'abattement des matières en suspension (débit de consigne $Q/h_{max} = 1$ L/s/ha pour les scénarios de régulation des débits)

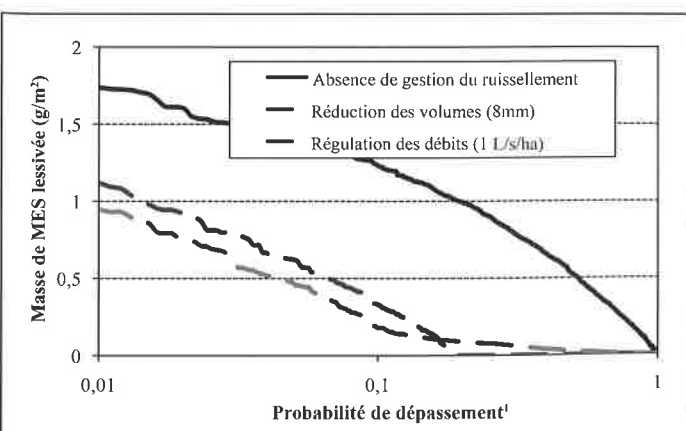
Ces résultats indiquent en premier lieu qu'à taille d'ouvrage équivalente, les techniques alternatives conçues pour l'abattement des volumes ruisselés donnent lieu à un abattement des flux de MES nettement plus important que des ouvrages de régulation, y compris pour de faibles débits de fuite. Avec une vitesse d'infiltration de 5 mm/h et une surface correspondant à 2,5 % de la surface drainée, l'objectif d'abattement de 85 % des masses de MES ne peut, par exemple, être atteint pour la régulation des débits alors qu'il ne nécessiterait qu'un volume mort (h_p) de 12 mm dans le cas de l'abattement des volumes ruisselés. Cette différence entre les deux approches tend cependant à diminuer lorsque les vitesses d'infiltration augmentent. L'abattement des flux de polluants est en effet principalement expliqué par les pertes continues dans l'ouvrage (infiltration et évapotranspiration) et sera donc d'autant plus important que le débit de fuite est faible comparé à ces dernières. Ainsi, pour un ratio de surface b de 2,5 %, un débit de fuite de 1 L/s/ha correspond à un rejet de 14,4 mm/h. Cette valeur de 1 L/s/ha n'étant atteinte que lorsque l'ouvrage est plein, le débit de rejet effectif est alors nettement inférieur et peut donc rapidement devenir négligeable devant les pertes continues par infiltration et évapotranspiration.

Afin de mieux appréhender la différence entre les approches de régulation des débits et d'abattement des volumes ruisselés, les distributions des masses événementielles de MES obtenues pour chacune de ces stratégies sont comparées pour deux configurations

correspondant à un abattement de 85 % des flux de MES sur la période de simulation. En retenant une vitesse d'infiltration de 10 mm/h et un ratio surface d'ouvrage-surface d'apport (b) de 2,5 %, les résultats précédents indiquent que la régulation des débits à 1 L/s/ha dans un ouvrage de capacité h_{max} de 12 mm (sans volume mort) équivaut, sur la période de simulation, à la mise en œuvre d'un ouvrage présentant un volume mort (h_p) de 8 mm. Comme le montre la figure 5, si la régulation des débits permet d'obtenir une réduction importante des flux de MES pour les fréquences de dépassement inférieures à 0,1, elle donne en revanche lieu à un rejet quasi systématique de polluants pour toutes les pluies, y compris les plus courantes. L'efficacité réduite des stratégies de régulation des débits s'explique donc principalement par leur effet limité vis-à-vis des pluies faibles : la présence d'un volume mort dans les ouvrages de régulation est donc probablement souhaitable pour réduire plus efficacement la fréquence des rejets de polluants.

2.3. Effet de la dynamique d'émission

Alors que les résultats précédents ne font apparaître que la moyenne des abattements simulés sur les cinq chaussées du Marais, la figure 6 permet de visualiser la variabilité induite par la paramétrisation du modèle de production des MES et de comparer les abattements en flux aux abattements volumiques (dans le cas d'une stratégie d'abattement des volumes ruisselés). Pour un volume cible (h_p) de 5 mm, on observe par exemple jusqu'à 23 % d'écart entre les abattements en masse de MES simulés pour les différentes chaussées et les abattements en volume de ruissellement. Ces différences,



¹Fréquence à laquelle un événement donnant lieu à un rejet supérieur à un seuil donné est observé.
Figure 5. Distribution des masses événementielles de matières en suspension (MES) pour la régulation des débits et l'abattement des volumes ruisselés dans des configurations équivalentes (ratio surface d'ouvrage : surface d'apport $b = 2,5$ % ; vitesse d'infiltration $K = 10$ mm/h)

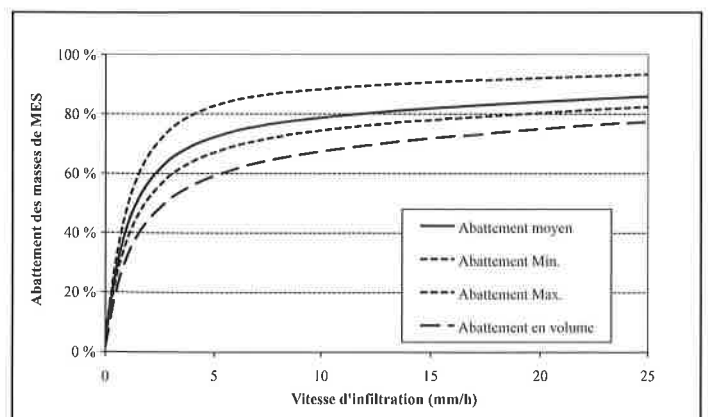


Figure 6. Abattements simulés pour les différentes chaussées (hauteur de ruissellement $h_p = 5$ mm, ratio surface d'ouvrage : surface d'apport $b = 2,5$ %)

résultant directement de la paramétrisation des modèles d'A. Kanso, suggèrent donc que la dynamique d'émission des polluants pourrait avoir une incidence importante sur les efficacités simulées.

La réduction des flux de MES la plus importante est obtenue sur la chaussée 2 alors que la moins bonne performance est simulée pour la chaussée 5 (bien que le même modèle soit employé). Afin de mieux comprendre l'écart important entre ces deux chaussées, une caractérisation sommaire de la dynamique d'émission simulée sur chacune d'entre elles est ici proposée. Les « courbes-MV », représentant la masse de polluants cumulée (normalisée) en fonction du volume de ruissellement cumulé (normalisé) sont fréquemment employées pour visualiser la dynamique d'émission des polluants à l'échelle d'une pluie [BERTRAND-KRAJEWSKI *et al.*, 1998]. Une simple fonction puissance ($M = V^c$) est donc ici ajustée à chaque événement pluvieux afin de caractériser (à partir du paramètre c) la répartition de la masse de contaminant en fonction du volume ruisselé. La distribution du paramètre c permet alors de comparer le comportement des deux modèles de production des MES sur les 15 années de simulation (figure 7).

Les valeurs du paramètre c ajustées pour la chaussée 2 sont globalement nettement inférieures à celles obtenues pour la chaussée 5. La proportion de la masse de MES associée à un événement lessivée en début de pluie est donc généralement plus importante sur la chaussée 2 que sur la chaussée 5. Cette différence est en grande partie expliquée par une valeur élevée du paramètre de lessivage W pour la première, donnant lieu à une mobilisation plus efficace du stock de polluant accumulé

avec les premiers millimètres de ruissellement. L'abattement des premiers millimètres de ruissellement donne alors lieu à une réduction plus marquée des flux de polluants pour la chaussée 2, tandis qu'à l'inverse, les concentrations simulées pour chaussée 5 étant plus constantes au cours de la pluie (c proche de 1), l'abattement des flux de MES demeure, sur la chaussée 5, assez comparable à celui des volumes ruisselés (figure 5).

Bien qu'une analyse approfondie de la validité et de la sensibilité de ces résultats aux différentes hypothèses de modélisation soit nécessaire, l'écart entre les abattements simulés d'une chaussée à l'autre indique donc que l'efficacité des ouvrages pourrait être assez dépendante de la dynamique d'émission des polluants.

Conclusions et perspectives

La méthodologie présentée dans cet article pourrait servir de support à l'analyse de diverses stratégies de gestion à la source des eaux pluviales pour différentes hypothèses de modélisation. Les premiers résultats obtenus, pour un cas relativement simple, indiquent que les approches d'abattement des volumes ruisselés sont probablement préférables à celles de régulation des débits pour la maîtrise des flux de polluants. Des abattements importants semblent en effet pouvoir être atteints en ciblant des volumes relativement faibles lorsque l'infiltration et l'évaporation des volumes ruisselés sont privilégiées. À l'inverse, la régulation des débits imposerait, à performance équivalente, d'avoir recours à des ouvrages de taille plus importante, y compris lorsque les débits de fuite demeurent

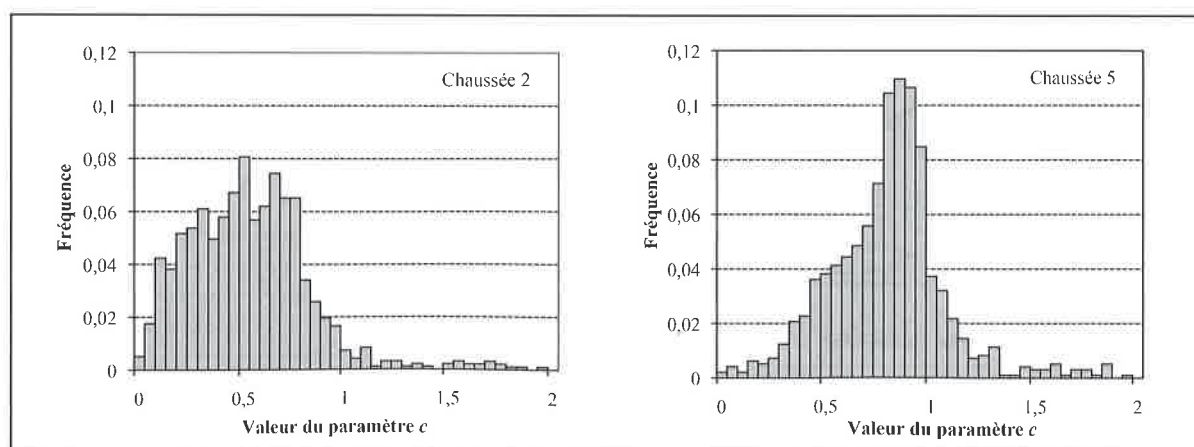


Figure 7. Résultat de l'ajustement de courbes MV sur les chaussées 2 et 5 (distribution du paramètre c)

faibles. La simulation de ces deux modes de gestion des eaux pluviales pour cinq chaussées différentes permet par ailleurs de mettre en évidence l'importance de la dynamique d'émission des contaminants. L'efficacité des ouvrages à l'amont est ainsi en partie conditionnée par la variabilité temporelle des concentrations dans les eaux de ruissellement.

Ces résultats doivent cependant être interprétés avec prudence, car ils reposent sur de nombreuses hypothèses de modélisation (hydrologiques ou non) dont il semble indispensable de préciser l'incidence à travers une analyse de sensibilité approfondie. Les travaux en cours visent en particulier à déterminer si des modèles d'infiltration simples permettent ou non d'estimer de façon satisfaisante les abattements volumiques dans l'ouvrage ou si, à l'inverse, la modélisation des techniques alternatives requiert une réelle prise en compte de l'état hydrique du sol. La sensibilité des abattements simulés aux modèles de production des flux de

polluants impose par ailleurs de vérifier, pour les MES, la validité des formulations existantes, mais également de tester des dynamiques d'émission différentes, en distinguant notamment formes dissoutes et particulaires. Une étude complémentaire, reposant sur des mesures en continu des concentrations dans les eaux de ruissellement issues de toitures en zinc ou de chaussées urbaines, devrait ainsi permettre d'évaluer plus précisément la pertinence des différentes solutions de gestion des eaux pluviales pour une maîtrise à la source des flux de polluants. Il semble enfin important de préciser que les abattements simulés correspondent ici à une accumulation des contaminants interceptés dans le sol de l'ouvrage. Si le devenir de ces polluants n'est pas abordé dans le cadre de cette étude, il conviendra nécessairement de s'interroger sur les implications d'une infiltration systématique des volumes ruisselés et en particulier sur la capacité du sol à retenir durablement ces contaminants.

Bibliographie

AHIABLAUME L., ENGEL B., CHAUBEY I. (2012) : « Effectiveness of low impact development practices: Literature review and suggestions for future research ». *Water, Air, Soil Pollut.* ; 223 : 4253-73. doi:10.1007/s11270-012-1189-2

BERTRAND-KRAJEWSKI J.L., CHEBBO G., SAGET A. (1998) : « Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon ». *Water Res.* ; 32 : 2341-56. doi:10.1016/S0043-1354(97)00420-X

BRESSY A. (2010) : *Flux de micropolluants dans les eaux de ruissellement urbaines. Effets de différents modes de gestion des eaux pluviales* [thèse]. Paris, Université Paris Est.

DAVIS A.P., HUNT W.F., TRAVER R.G., CLAR M. (2009) : « Bioretention technology: overview of current practice and future needs ». *J. Environ. Eng.* ; 135 (3) : 109-117. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109)

DELETIC A. (1998) : « The first flush load of urban surface runoff ». *Water Res.* ; 32 : 2462-70. doi:10.1016/S0043-1354(97)00470-3

EGODAWATTA P., THOMAS E., GOONETILLEKE A. (2007) : « Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall ». *Water Res.* ; 41 : 3025-31. doi:10.1016/j.watres.2007.03.037

FÖRSTER J. (1996) : « Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration ». *Water Science and Technology* ; 33(6) : 39-48. doi:10.1016/0273-1223(96)00329-0

GNECCO I., BERRETTA C., LANZA L.G., LA BARBERA P. (2005) : « Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy ». *Atmos. Res.* ; 77 : 60-73. doi:10.1016/j.atmosres.2004.10.017

GROMAIRE M., ROBERT-SAINTE P., BRESSY A., SAAD M., DE GOUVELLO B., CHEBBO G. (2011) : « Zn and Pb emissions from roofing materials-modelling and mass

balance attempt at the scale of a small urban catchment ». *Water Sci. Technol.* ; 63 : 2590-7.

HATT B.E., FLETCHER T.D., DELETIC A. (2009) : « Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater bio-filtration systems at the field scale ». *J. Hydrol.* ; 365 : 310-21. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.001

HE W., ODNEVALL WALLINDER I., LEYGRAF C. (2001) : « A laboratory study of copper and zinc runoff during first flush and steady-state conditions ». *Corros. Sci.* ; 43(1) : 127-46. doi:10.1016/S0010-938X(00)00066-4

KANSO A. (2004) : *Évaluation des modèles de calcul des flux polluants des rejets urbains par temps de pluie: Apport de l'approche bayésienne* [thèse]. Paris, École des Ponts Paristech.

LEMONSU A., MASSON V., BERTHIER E. (2007) : « Improvement of the hydrological component of an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model ». *Hydrol. Process.* ; 21 (16) : 2100-11. doi: 10.1002/hyp.6373

MDE (2009) : *Maryland Stormwater design manual*, Volumes I & II. Guide technique. États-Unis.

MPCA (2005) : *Minnesota stormwater manual*. Guide technique. États-Unis.

PDEP (2006) : *Pennsylvania stormwater best management practices manual*. Guide Technique. États-Unis.

PETRUCCI G. (2012) : *La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines. Confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique*. Université Paris-Est.

PETRUCCI G., RIOUST E., DEROUBAIX J.F., TASSIN B. (2013) : « Do stormwater source control policies deliver the right hydrologic outcomes? » *J. Hydrol.* ; 485 : 188-200. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.018

RAGAB R., BROMLEY J., ROSIER P., COOPER J.D., GASH J.H.C. (2003a) : « Experimental study of water fluxes in a residential area: 1. Rainfall, roof runoff and evaporation: the effect of slope and aspect ». *Hydrol. Process.* : 17 : 2409-22. doi:10.1002/hyp.1250

RAGAB R., ROSIER P., DIXON A., BROMLEY J., COOPER J.D. (2003b) : « Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation ». *Hydrol. Process.* : 17 : 2423-37. doi:10.1002/hyp.1251

RAMIER D. (2004) : *Bilan hydrique des voiries urbaines: observations et modélisation* [thèse]. Nantes, École centrale de Nantes et Université de Nantes.

RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., MORENA F. (2008) : « A distributed hydrological model for urbanized areas -

Model development and application to case studies ». *J. Hydrol.* : 351 : 268-87. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.007

SCHRIEWER A., HORN H., HELMREICH B. (2008) : « Time focused measurements of roof runoff quality ». *Corros. Sci.* : 50 : 384-91. doi:10.1016/j.corsci.2007.08.011

TROWSDALE S.A., SIMCOCK R. (2011) : « Urban storm-water treatment using bioretention ». *J. Hydrol.* : 397 : 167-74. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.11.023

WILD T.B., DAVIS A.P. (2009) : « Simulation of the performance of a storm-water BMP ». *J. Environ. Eng.* : 135 (12) : 1257-67. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000106

ZHANG S., GUO Y. (2012) : « Explicit equation for estimating storm-water capture efficiency of rain gardens ». *J. Hydrol. Eng.* : 18 : 1739-48. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000734

Résumé

J. SAGE, E. BERTHIER, M.-C. GROMAIRE

Modélisation des stratégies de régulation des débits et d'abattement des volumes ruisselés pour la maîtrise à la source des flux de contaminants

Bien que la maîtrise à la source des flux d'eau et de polluants soit à l'heure actuelle largement encouragée pour limiter les impacts du rejet d'eaux pluviales urbaines sur les milieux récepteurs, les critères de gestion donnés aux aménageurs demeurent assez variables d'un pays à l'autre et restent souvent peu explicites. Les critères hydrologiques sont par exemple fréquemment exprimés comme des objectifs de réduction des débits de pointe et plus rarement d'abattement des volumes ruisselés. Si ces critères sont généralement supposés permettre de limiter les rejets de contaminants à l'amont, peu d'éléments objectifs permettent toutefois de réellement quantifier leur effet, et la détermination de valeurs optimales pour la régulation des débits comme pour l'abattement des volumes

ruisselés demeure par ailleurs une question ouverte. La méthodologie présentée ici vise donc à analyser la pertinence des approches d'abattement des volumes ruisselés ou de régulation des débits pour la maîtrise à la source des flux de polluants. La mise en œuvre de ces deux stratégies a été simulée (sur une période de 15-ans) à partir d'un modèle relativement simple d'ouvrage perméable végétalisé vers lequel seraient dirigées des eaux de ruissellement de chaussées urbaines. Les premiers résultats indiquent que l'abattement de volumes de ruissellement modérés pourrait donner lieu à une réduction importante des flux de polluants dirigés vers les milieux, bien que l'efficacité des solutions mises en œuvre semble dépendante de la dynamique d'émission des contaminants considérés.

J. SAGE, E. BERTHIER, M.-C. GROMAIRE

Simulation of various stormwater management strategies for on-site pollution control : flow-rate and volume-based approaches

Although the need for on-site runoff and pollution control is generally well accepted by both scientists and practitioners, there is no real agreement on the suitability of the different stormwater management criteria given to practitioners for the design of source-control systems. Hydrologic criteria, directly related to the sizing of stormwater management facilities, are for instance either expressed as flow-rate or volume targets. While these criteria are usually assume to provide adequate runoff or pollution control, their comparison has only received scant attention and the specification of these volume or flow-rate control targets often remains poorly justified. In this article, a methodology is therefore developed to investigate the suitability of different

flow-rate or volume based stormwater management scenarios for on-site pollution control. Flow-rate control and volume-reduction strategies are simulated over a 15-year rainfall period with a relatively simple and conceptual "urban catchment + BMP" modelling system, for which different scenarios can be considered in terms of runoff and pollutant wash-off dynamics or stormwater facility design. First results indicate that the capture of relatively small runoff volumes, later infiltrated or lost through evapotranspiration, can result in a significant reduction of pollutant loads discharged to surface waters or sewer systems, although BMPs efficiency appears quite sensitive to pollutant wash-off dynamics.