



HAL
open science

Comparaison de différentes solutions de gestion des eaux pluviales dans un projet d'aménagement

Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Pauline Herrero

► **To cite this version:**

Jean-Luc Bertrand-Krajewski, Pauline Herrero. Comparaison de différentes solutions de gestion des eaux pluviales dans un projet d'aménagement. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2016, 4, pp.28 - 42. 10.1051/tsm/201604028 . hal-01758988

HAL Id: hal-01758988

<https://hal.science/hal-01758988v1>

Submitted on 5 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMPARAISON DE DIFFERENTES SOLUTIONS DE GESTION DES EAUX PLUVIALES DANS UN PROJET D'AMENAGEMENT

COMPARISON OF VARIOUS APPROACHES FOR STORMWATER MANAGEMENT IN AN URBANISATION PROJECT

Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI ¹ *, Pauline HERRERO ^{1,2}

1. Université de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP, 34 avenue des Arts, F-69621 Villeurbanne cedex
2. GRAIE, Domaine scientifique de la Doua, 66 bd Niels Bohr, CS 52132, F-69603 Villeurbanne cedex

* Auteur correspondant : jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr

Résumé

Trois scénarios de gestion des eaux pluviales sur une zone artisanale de 6.5 ha fortement imperméabilisée ont été étudiés : i) un réseau de collecteurs pluviaux avec un bassin d'infiltration aval, ii) des noues d'infiltration en cascade le long des voiries et iii) des toitures végétalisées et des noues d'infiltration. Dans un premier temps, le dimensionnement des ouvrages est réalisé avec une pluie de projet double triangle de période de retour de 10 ans. Dans un deuxième temps, des simulations en continu du fonctionnement des ouvrages, au pas de temps de 6 minutes, sur une série chronologique (pluie et évapotranspiration) de 21 ans (1992-2012) sont réalisées. Les différences sont très marquées entre les scénarios. Dans le premier scénario, le réseau séparatif pluvial comporte 535 m de conduites et un bassin d'infiltration aval de 1600 m³. Dans le troisième scénario, les toitures sont entièrement végétalisées avec une capacité maximale de stockage de 32 mm/m², ce qui permet de diviser par deux le linéaire de noues d'infiltration déterminé dans le deuxième scénario avec des toitures classiques. Les toitures végétalisées réduisent de 42 % les volumes ruisselés. Par rapport au dimensionnement classique avec une pluie de projet, les simulations en continu permettent d'étudier de manière détaillée le fonctionnement hydrologique des ouvrages à toutes les échelles de temps (du pas de temps à l'événement, de l'événement à l'année et à l'échelle interannuelle), de procéder à l'analyse statistiques des résultats, de comprendre le comportement du système pour des événements particuliers au sein de la série chronologique et éventuellement de revoir son dimensionnement.

Mots clés

Bilan hydrologique, infiltration, modélisation, noues, réseau séparatif pluvial, série chronologique, toitures végétalisées.

Abstract

Three scenarios for stormwater management in a very impervious 6.5 ha industrial area were investigated: i) a separate stormwater pipe system with a downstream infiltration tank, ii) a cascade of infiltration swales along roads and iii) vegetated roofs and infiltration swales. Firstly, the facilities were sized according to a double triangle design storm with a 10 year return period. Secondly, continuous simulations of the behavior of the facilities were carried out, with a 6 minute time step for time series (rainfall and evapotranspiration) over 21 years (1992-2012). Differences are very significant between the three scenarios. In the first scenario, the separate stormwater network includes 535 m of pipes and a 1600 m³ downstream infiltration tank. In the third scenario, the roofs are entirely vegetated, with a maximum storage capacity of 32 mm/m², allowing to divide by two the total length of swales compared to the second scenario with impervious roofs. Vegetated roofs allow a decrease of 42 % of the runoff volume. Compared to conventional sizing with a design storm, continuous simulations allow to study in detail the hydrological behavior of the facilities at all time scales (from the time step to the event scale, from the event to the year and the multi-year scales), to run statistical analysis of the results, to understand the behavior of the system for particular events or periods within the time series and possibly revise the design.

Keywords

Hydrological mass balance, infiltration, modelling, swales, separate stormwater system, time series, vegetated roofs.

INTRODUCTION

Cet article s'inscrit dans le cadre d'une dynamique portée par le groupe de travail « Eaux pluviales et aménagement » du GRAIE (Groupe de recherche Rhône-Alpes sur les Infrastructures et l'Eau) qui vise à améliorer la prise en compte et la gestion des eaux pluviales en privilégiant leur gestion à la source ou décentralisée. Le groupe de travail a souhaité réaliser une étude de cas permettant de comparer différentes solutions de gestion des eaux pluviales dans le cadre d'un projet d'aménagement. Cet article en présente les résultats principaux en termes d'aspects techniques (dimensionnement et modélisation du fonctionnement des ouvrages) ; les aspects institutionnels, opérationnels et financiers (coûts d'investissement et d'exploitation) ne sont pas pris en compte ici et devront faire l'objet d'une étude approfondie complémentaire.

Les objectifs de l'étude étaient les suivants :

- Construire l'étude de cas à partir d'une situation réelle.
- Dimensionner différents scénarios techniques (réseau pluvial classique, noues d'infiltration et toitures végétalisées).
- Modéliser leurs fonctionnements hydrologiques pour une chronique climatologique de longue durée.
- Définir des critères d'évaluation des scénarios.
- Comparer les performances des différents scénarios, discuter les résultats et les modèles mis en œuvre.
- Identifier les perspectives de travail.

L'étude de cas a été construite à partir d'une zone artisanale en cours d'aménagement. Trois scénarios techniques ont été définis et analysés : i) un réseau séparatif pluvial classique, ii) des noues d'infiltration et iii) des noues d'infiltration et des toitures végétalisées. Les trois scénarios comportent un bassin d'infiltration situé à l'exutoire du bassin versant. Après dimensionnement, le fonctionnement hydrologique des trois scénarios a été simulé sur la période 1992-2012. Les paragraphes suivants présentent successivement le site et les scénarios d'étude, les modèles mis en œuvre, les données climatologiques utilisées pour le dimensionnement et les simulations de longue durée, les indicateurs de performance, les résultats obtenus et leur discussion.

1. DONNEES ET METHODES

1.1 SITE ET SCENARIOS D'ETUDE

Le site d'étude est une zone artisanale (ZA) située dans l'Ain à 34 km au nord-est de Lyon et d'une superficie totale de 6.5 ha. La ZA a été créée en 2006 et son aménagement est en cours d'achèvement (Figure 1). Nous avons considéré, pour les trois scénarios étudiés, que l'aménagement était complet. La ZA comporte essentiellement des bâtiments de types commerciaux et industriels, avec un taux d'imperméabilisation très important (toitures, parkings et voies de circulation) pour la partie déjà aménagée. A terme, le projet prévoit que la ZA sera presque entièrement imperméabilisée. Cette situation particulière permet de bien mettre en évidence les résultats des différents scénarios puisque la gestion des eaux pluviales constitue un enjeu fort sur ce bassin versant.

Les trois scénarios définis pour cette étude de cas diffèrent du projet réel établi par le bureau d'études SEDic. Dans ce dernier, en effet, environ 2 ha de surfaces imperméabilisées (voiries et parkings) sont raccordés au réseau pluvial aboutissant à un bassin d'infiltration aval, soit environ un tiers de la surface active raccordée au système. Les eaux de toitures sont infiltrées à la parcelle. Les trois scénarios étudiés illustrent des approches types différentes à des fins de comparaison. Dans un cas réel, plusieurs combinaisons de techniques différentes de gestion des eaux pluviales peuvent naturellement être envisagées et mises en œuvre.

La ZA est située sur une zone d'alluvions fluvio-glaciaires. Le sol est constitué principalement de graves sableuses favorables à l'infiltration des eaux pluviales. Deux essais d'infiltration de type Porchet effectués *in situ* à une profondeur de 1.3 m environ ont montré une conductivité hydraulique élevée, comprise entre 0.6 et 1.0×10^{-3} m/s (Lozano et Landry, 2005). La valeur basse a été retenue pour notre étude, soit 0.6×10^{-3} m/s.

La rivière Ain se situe à environ 4 km à l'est de la ZA. Les cotes NGF de la ZA varient entre 215.7 et 217.4 m, et le niveau des plus hautes eaux de la nappe de la Basse Plaine de l'Ain est estimé à 210 m NGF. La zone non saturée sous la ZA est donc toujours présente et d'une épaisseur minimale de 5 à 6 m environ.



Figure 1. Vue générale de la ZA prise comme cas d'étude et délimitation du bassin versant (source : Communauté de Communes de la Plaine de l'Ain).

Les caractéristiques du bassin versant, découpé en 13 sous-bassins versants correspondant aux différentes parcelles de la ZA, sont résumées dans le Tableau 1.

Type de surface	Surface (ha)	Coefficient de ruissellement (-)
Voiries	1.23	0.95
Toitures	3.23	0.95 ⁽¹⁾
Parkings et autres surfaces	1.39	0.70
Total	5.85 ⁽²⁾	-

Tableau 1. Caractéristiques du bassin versant de la ZA (données SEDic sous Canoé)

(1) : uniquement pour les scénarios où les toitures ne sont pas végétalisées.

(2) : la différence par rapport à la surface totale de 6.5 ha est due au fait que certaines surfaces ne sont pas connectées au système de gestion des eaux pluviales.

Dans le premier scénario S1, toutes les eaux de ruissellement des toitures, des voiries, des parkings et des autres surfaces imperméabilisées sont collectées dans un réseau pluvial séparatif strict constitué de collecteurs aboutissant à un bassin d'infiltration situé à l'exutoire du bassin versant (Figure 2).

Le deuxième scénario S2 remplace entièrement le réseau de collecteurs du scénario S1 par des noues d'infiltration en cascade placées le long des voiries, les noues collectant toutes les eaux de ruissellement des toitures, des voiries, des parkings et des autres surfaces imperméabilisées. Il est prévu une noue par sous-bassin versant. La dernière noue aval peut évacuer des eaux par trop plein vers un bassin d'infiltration situé à l'exutoire du bassin versant.

Le troisième scénario S3 diffère du scénario S2 au niveau des toitures : toutes les toitures classiques des scénarios S1 et S2 sont remplacées par des toitures végétalisées qui stockent et évapotranspirent les eaux de pluie de chaque parcelle, et dont le trop plein éventuel, lorsqu'elles sont saturées, est évacué vers les noues d'infiltration qui collectent directement les eaux de ruissellement des voiries, des parkings et des autres surfaces imperméabilisées.

Les détails des modèles mis en œuvre pour simuler les trois scénarios sont présentés dans le paragraphe 1.2 ci-dessous. Les lecteurs qui le souhaitent peuvent aller directement au paragraphe 1.3 qui décrit les données pluviométriques et d'évapotranspiration utilisées dans la modélisation.



Figure 2. Scénario 1 : réseau pluvial séparatif et bassin d'infiltration aval (source : document SEDic ayant servi à l'établissement du scénario 1).

1.2 MODELES

1.2.1 Scénario S1

Pour le scénario S1, le ruissellement et les écoulements dans les collecteurs sont modélisés avec le logiciel Canoé®. Le réseau étant simple, ramifié et convergent, le modèle hydraulique utilisé est le modèle Muskingum. L'étude de cas a repris sous Canoé® version 4 la structure du réseau (Figure 2) et sa représentation réalisées par le bureau d'études SEDic. Le bassin d'infiltration en aval du réseau est modélisé de la même manière que les noues d'infiltration décrites ci-dessous.

1.2.2 Scénario S2

Dans le scénario S2, un modèle simple du fonctionnement des noues a été développé sous Matlab® pour les besoins de l'étude. Les noues sont caractérisées de manière simplifiée par une largeur B (m) unique fixée à 2.5 m et par une longueur L_i (m) avec i l'indice du sous-bassin versant correspondant.

Comme indiqué Figure 3, les entrées dans la noue N_i sont le ruissellement Q_{eNi} du sous-bassin versant i , la pluie au-dessus de la noue Q_{pNi} et la surverse éventuelle Q_{sNi-1} de la noue amont N_{i-1} ; les sorties sont l'infiltration Q_{infNi} , la surverse éventuelle Q_{sNi} vers la noue aval N_{i+1} et l'évaporation Q_{evNi} . Si la hauteur d'eau dans la noue dépasse un niveau maximal $H_{imax} = 0.5$ m (ce qui correspond à une capacité de stockage maximale dans la noue de $1.25 \text{ m}^3/\text{m}$), il peut y avoir débordement avec un débit Q_{dNi} déterminé en bouclant le bilan de masse dans la noue à chaque pas de temps.

Le débit Q_{eNi} (m^3/s) entrant dans la noue d'infiltration N_i depuis les trois types de surface contributives (toitures, voiries, parkings et autres surfaces imperméabilisées) est modélisé pour chaque sous-bassin versant avec Canoé® version 4.

Le débit précipité Q_{pNi} (m^3/s) est donné par la relation

$$Q_{pNi} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} I B L_i \quad \text{Eq. 1}$$

avec I l'intensité de la pluie (mm/h).

Les noues sont disposées en cascade et sont séparées les unes des autres par des seuils fonctionnant comme des déversoirs à seuil épais (épaisseur $b = 1.2$ m) sans contraction latérale lorsque la hauteur d'eau dans la noue N_i atteint le niveau a (m) requis pour déverser vers la noue aval N_{i+1} . Dans ces conditions, le débit de surverse Q_{sNi} (m^3/s) est calculé par la relation suivante (Eq. 8.40, Lencastre, 1996) :

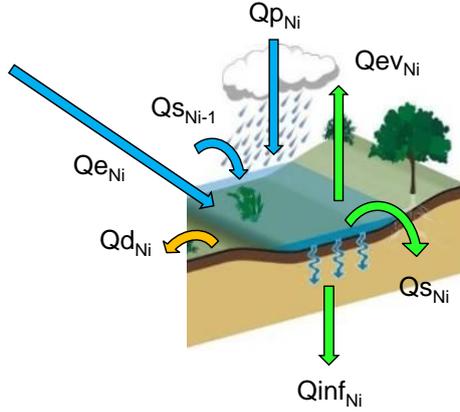


Figure 3. Schéma de fonctionnement d'une noue dans le scénario S2.
(complété à partir de <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be>).

$$Q_{sNi} = 1.7C_d C_v B (H_i - a)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Eq. 2}$$

avec

C_d coefficient de déversement égal à 0.848 (abaque 197, Lencastre, 1996)

C_v coefficient de déversement égal à ≈ 1.0 (abaque 196, Lencastre, 1996)

a hauteur du seuil de déversement par rapport au fond de la noue (m) : on a fixé $a = 0.4$ m.

Le débit d'infiltration Q_{infNi} (m^3/s) pour la noue Ni est proportionnel à la surface en contact avec l'eau (l'infiltration se produit par le fond et les parois de la noue) :

$$Q_{infNi} = KL_i(2H_i + B) \quad \text{Eq. 3}$$

avec

K conductivité hydraulique (m/s) prise égale à 0.6×10^{-3} m/s.

H_i hauteur d'eau dans la noue Ni (m).

La noue est également soumise à l'évaporation, prise en compte lorsqu'elle contient une hauteur d'eau H_i non nulle. On néglige l'évapotranspiration par la végétation qui tapisse le fond de la noue lorsque la noue est vide d'eau. Le débit par évaporation Q_{evNi} (m^3/s) est calculé par la relation :

$$Q_{evNi} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} e_v B L_i \quad \text{Eq. 4}$$

avec e_v l'évaporation (mm/h) déterminée à partir de l'évaporation EV (mm/j) calculée par la relation de Horton (1917) (Eq. 6-9, Llamas, 1993) :

$$EV = 3((2 - e^{-0.124w})e_s - e_a) \quad \text{Eq. 5}$$

avec

w vitesse du vent (km/h)

e_s pression moyenne de vapeur d'eau (kPa) à la température de surface de l'eau θ ($^{\circ}C$) calculée par la relation de Magnus (Eq. 6-13, Llamas, 1993) :

$$e_s = 0.6035 \times 10^{\left(\frac{7.447 \times \theta}{\theta + 234.67}\right)} \quad \text{Eq. 6}$$

e_a pression moyenne de l'air (kPa) sur la surface de l'eau (Llamas, 1993) :

$$e_a = H_R e_s \quad \text{Eq. 7}$$

H_R humidité relative (-).

L'équation de bilan de masse à chaque pas de temps permet d'établir l'équation différentielle du fonctionnement de la noue Ni , résolue avec un schéma aux différences finies d'ordre 1 :

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{1}{BL_i} (Q_{eNi} + Q_{pNi} + Q_{sNi-1} - Q_{infNi} - Q_{evNi} - Q_{sNi} - Q_{dNi}) \quad \text{Eq. 8}$$

1.2.3 Scénario S3

Dans le scénario S3, toutes les toitures sont supposées végétalisées et équipées de bacs précultivés avec réserve alvéolaire, de type Hydropack® (Figure 4). Un modèle de ce type de toiture a été développé sous Matlab® en collaboration entre DEEP et Le Prieuré. Il a été testé et calé sur un pilote expérimental pour une série de 50 événements pluvieux (Brimo *et al.*, 2013, Principato *et al.*, 2015). Le modèle prend en compte l'évapotranspiration par la végétation (sédum), l'évaporation sur la fraction éventuellement non végétalisée de la toiture, le transfert de l'eau à travers le substrat, le stockage supplémentaire alvéolaire sous le substrat et sa disponibilité pour l'évapotranspiration par remontée à travers le système racinaire de la végétation.



Figure 4. Toiture végétalisée précultivée avec réserve alvéolaire de type Hydropack® (source : www.vegetalid.fr).

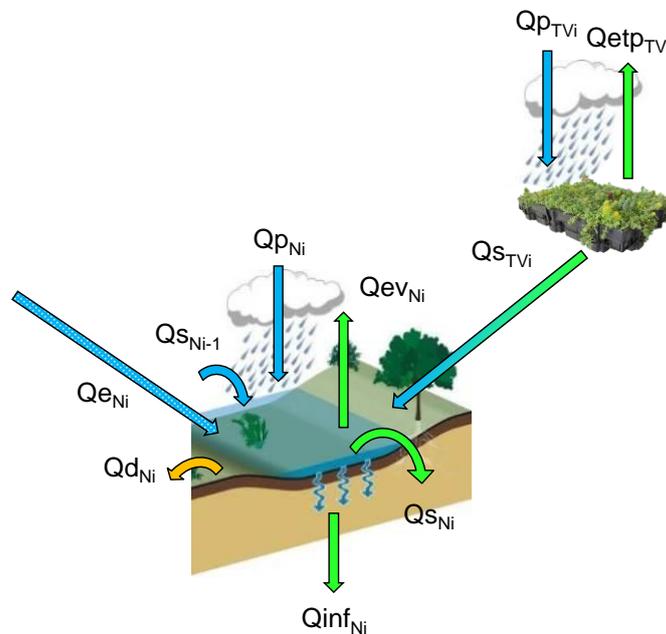


Figure 5. Schéma de fonctionnement d'une noue et d'une toiture végétalisée dans le scénario S3 (complété à partir de <http://guidebatimentdurable.bruxellesenvironnement.be> et de <http://www.vegetalid.us>).

Comme indiqué Figure 5, la seule entrée dans la toiture végétalisée TV_i correspondant au sous-bassin versant i est la pluie, avec un débit Q_{pTV_i} (m^3/s) calculé par la relation :

$$Q_{pTV_i} = \frac{1}{3,6 \times 10^6} I S_{TV_i} \quad \text{Eq. 9}$$

avec S_{TV_i} la surface de la toiture végétalisée (m^2) et I l'intensité de la pluie (mm/h).

Les sorties de la toiture végétalisée TV_i sont l'évapotranspiration et l'évaporation Q_{etpTV_i} et, lorsque le substrat est saturé et que la réserve alvéolaire est pleine, un débit de surverse Q_{sTV_i} en direction de la noue N_i . On fait deux hypothèses simplificatrices pour le modèle global à l'échelle du bassin versant : i) le débit Q_{sTV_i} est transféré instantanément de la toiture à la noue sans modéliser explicitement son transfert, ii) les transferts d'eau entre et sous les bacs Hydropack® couvrant chaque toiture sont négligés. Il en résulte que le débit de pointe sortant de la toiture végétalisée TV_i est légèrement surestimé et que l'hydrogramme correspondant est légèrement plus court qu'en réalité, mais sans changement des volumes évacués vers la noue.

Par rapport au scénario S2, les équations relatives à la noue N_i restent inchangées sauf celle du débit de ruissellement Q_{eN_i} qui est calculé en excluant les toitures végétalisées et en ne conservant que les voiries, parkings et autres surfaces imperméabilisées.

L'équation de bilan de masse à chaque pas de temps pour la toiture végétalisée TV_i permet d'établir l'équation différentielle suivante, avec H_{TV_i} la hauteur d'eau dans la toiture végétalisée :

$$\frac{dH_{TV_i}}{dt} = \frac{1}{S_{TV_i}} (Q_{pTV_i} - Q_{etpTV_i} - Q_{sTV_i}) \quad \text{Eq. 10}$$

L'équation de bilan de masse pour la noue N_i dans le scénario S3 s'écrit donc :

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{1}{BL_i} (Q_{eNi} + Q_{pNi} + Q_{sNi-1} + Q_{sTV_i} - Q_{infNi} - Q_{evNi} - Q_{sNi} - Q_{dNi}) \quad \text{Eq. 11}$$

1.3 DONNEES DE CALCUL ET DE MODELISATION

1.3.1 Pluie de projet utilisée pour le dimensionnement

Dans le scénario S1, les collecteurs sont dimensionnés avec la pluie de projet utilisée par le bureau d'études SEDic. Il s'agit d'une pluie double triangle symétrique discrétisée au pas de 6 minutes, d'une durée de 2h30, d'une hauteur totale de 39.2 mm et avec une intensité maximale de 115 mm/h (Figure 6). La période intense de 18 minutes correspond à une hauteur précipitée de 20.5 mm. D'après les données pluviométriques du Grand Lyon (Chocat, 2009) dont nous disposons, la période de retour de cette pluie de projet est d'environ 7 ans sur la durée totale de 2h30 et d'environ 10 ans sur la période intense de 18 minutes (voir Figure 9). Les collecteurs ainsi dimensionnés ont des diamètres compris entre 400 et 600 mm et représentent un linéaire total de 535 m.

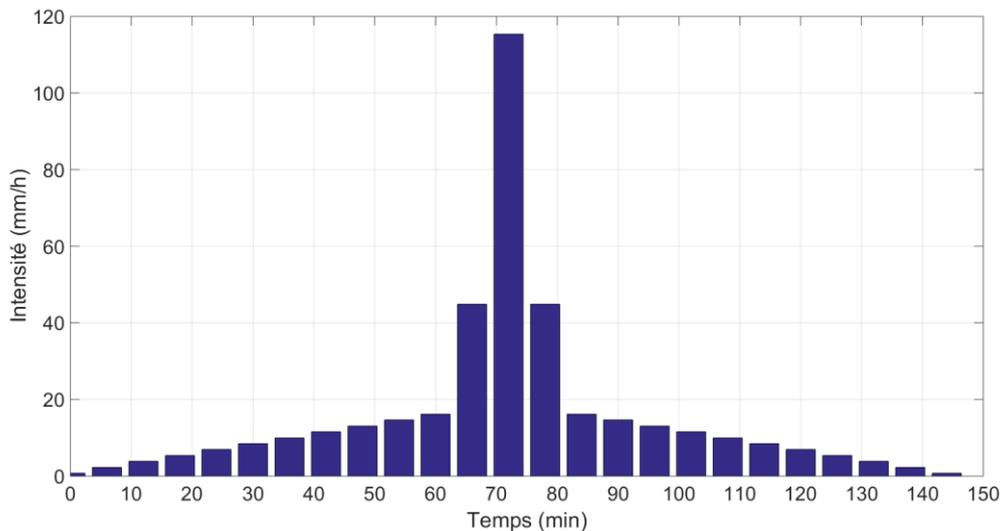


Figure 6. Pluie de projet double triangle utilisée dans le scénario S1, discrétisée au pas de temps de 6 minutes (source SEDic).

Cette pluie de projet est utilisée également dans les scénarios S2 et S3 pour le dimensionnement des noues : le modèle détermine automatiquement les longueurs de noues L_i de telle sorte qu'aucune noue ne déborde ($Q_{dNi} = 0$) pour la pluie de projet. On suppose pour le dimensionnement que les noues sont vides au début de la pluie de projet.

Dans le scénario S3, les toitures végétalisées ne sont pas dimensionnées spécifiquement pour la pluie de projet : elles sont considérées comme équipées de bacs de type Hydropack® standards dont la capacité de stockage totale, lorsque toute la capacité est disponible, est de 32 mm, soit une capacité du même ordre de grandeur que la hauteur précipitée de la pluie de projet qui est de 39.2 mm.

La pluie de projet a également été utilisée dans les trois scénarios pour dimensionner le bassin d'infiltration situé à l'exutoire du bassin versant. Comme les noues, le bassin ne doit pas déborder pour la pluie de projet et sa capacité d'infiltration est déterminée en fonction de la conductivité hydraulique K du sol naturel (Eq. 3). La hauteur d'eau maximale dans le bassin d'infiltration avant débordement est fixée à 1.5 m, ce qui permet de dimensionner sa surface au sol.

1.3.2 Données climatologiques pour les simulations sur la période 1992-2012

1.3.2.1 Précipitations

Après dimensionnement des ouvrages, les trois scénarios techniques sont simulés, avec les mêmes modèles que ceux ayant servi au dimensionnement, sur une chronique de 21 années, de 1992 à 2012, au pas de temps de 6 minutes. Les données ont été obtenues auprès de Météo France pour la station météorologique de Bron située sur le territoire du Grand Lyon car il n'y a pas

de séries chronologiques locales disponibles pour le site de la ZA. Les hauteurs précipitées annuelles varient de 722 mm (année 2011) à 1168 mm (année 1993), avec une moyenne sur 21 ans de 886 mm (Figure 7).

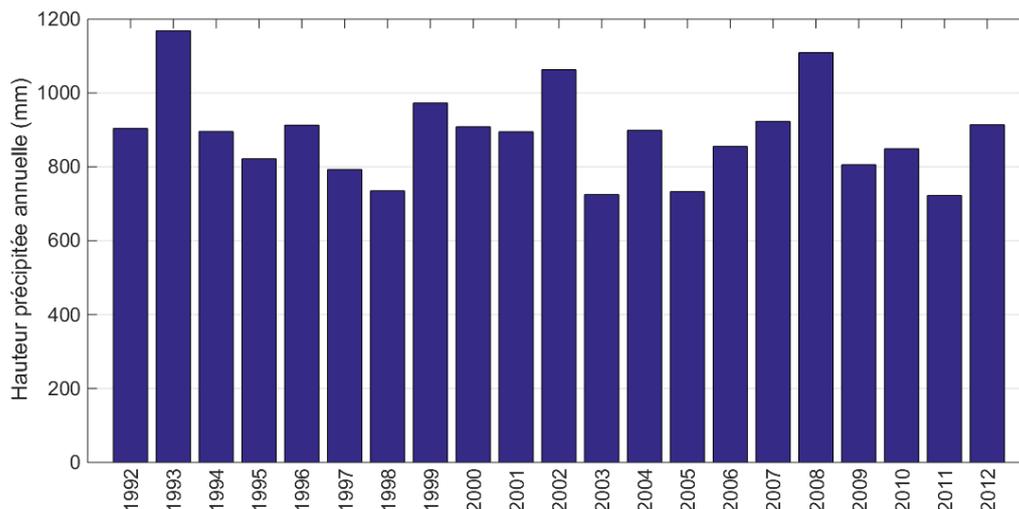


Figure 7. Pluviométrie annuelle sur la période 1992-2012.

La série chronologique de pluie est constituée directement des valeurs de l'intensité de précipitation I en mm/h au pas de temps de 6 minutes. Deux événements pluvieux sont considérés comme distincts s'ils sont séparés par au moins 2 heures de temps sec, le temps sec correspondant par convention à des intensités inférieures à 0.1 mm/h. Avec ces critères, la série chronologique contient 5031 événements pluvieux, dont seulement 2432 sont supérieurs ou égaux à 1 mm et 1739 sont supérieurs ou égaux à 2 mm.

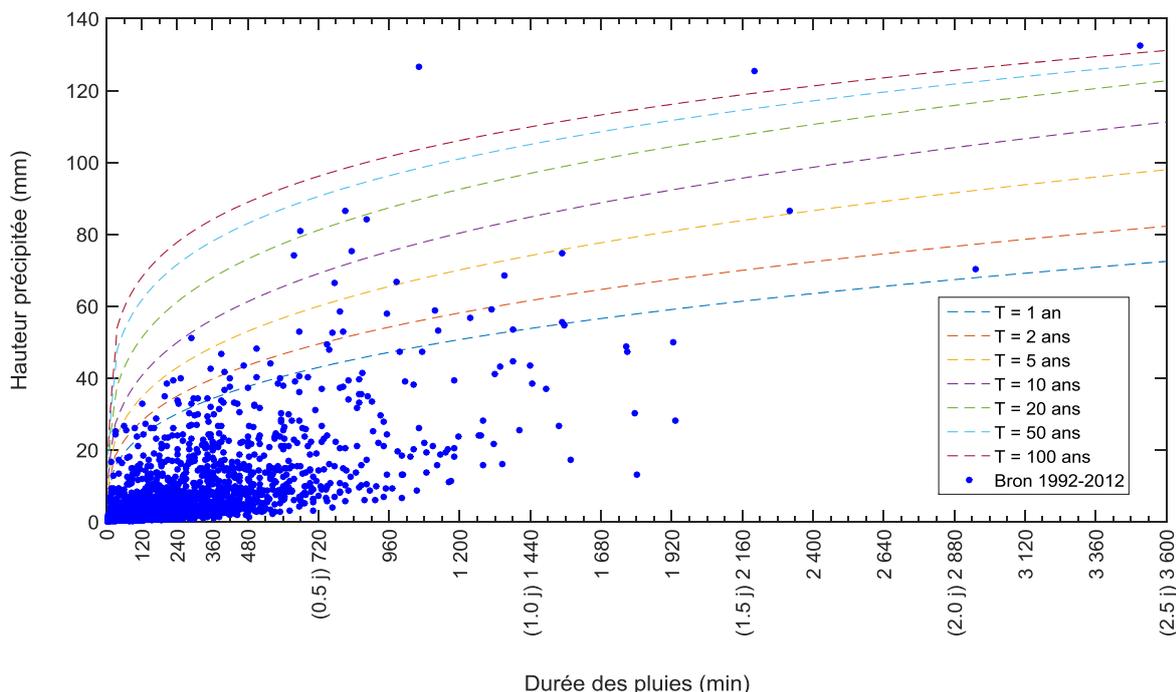


Figure 8. Diagramme durée – hauteur des événements pluvieux de la chronique 1992-2012 à Bron. Les courbes HDF correspondent aux données expérimentales du Grand Lyon.

La Figure 8 représente tous les événements pluvieux de la série 1992-2012 sur un graphique durée-hauteur, ainsi que les courbes HDF (Hauteur Durée Fréquence) déterminées à partir des données du Grand Lyon (Chocat, 2009) pour des périodes de retour de 1 à 100 ans. On constate que trois événements de la série chronologique dépassent la période de retour centennale. On observe onze événements dont les périodes de retour T sont comprises entre 5 et 50 ans, 21 événements pour T entre 2 et 5 ans, et 26 événements pour T entre 1 et 2 ans.

Il est important de noter que les durées et les hauteurs des événements représentés sur la Figure 8 dépendent nécessairement et étroitement de la définition de l'indépendance des événements (temps sec > 2 heures). Une autre définition aurait conduit à

d'autres délimitations des événements, donc à d'autres couples durée-hauteur et à une comparaison différente par rapport aux courbes HDF. Par ailleurs, ces événements et les courbes HDF ne sont caractérisés que par la durée et la hauteur précipitée : des hyétoigrammes très différents peuvent avoir la même durée et la même hauteur précipitée totale, et générer des débits ruisselés également très différents. La comparaison directe d'un hyétoigramme observé sur une durée donnée et d'une information simplificatrice de type HDF doit donc toujours être faite avec précaution quant à son interprétation.

Comparativement à la pluie de projet (Figure 9), pour la durée totale de 2h30 (150 min), tous les événements de la chronique ont des périodes de retour inférieures ou égales à 1 an ; pour la durée de pluie intense (18 min), un seul événement de la chronique a une période de retour d'environ 4 ans, tous les autres ont des périodes de retour inférieures à 1 an. Si on considère les 3664 événements de la chronique dont les durées sont inférieures ou égales à 150 min (Figure 9), seuls douze d'entre eux ont des périodes de retour comprises entre 1 an et 10 ans. Les événements de la série chronologique 1992-2012 dont les durées sont inférieures ou égales à 2h30 (150 min) ayant des périodes de retour estimées inférieures à celle de la pluie de projet, on peut raisonnablement s'attendre à ce que, pour la plupart de ces événements, les ouvrages soient *a priori* suffisamment dimensionnés. Cette conclusion n'est toutefois pas garantie compte tenu de la forme réelle des hyétoigrammes des événements de la chronique (ils peuvent présenter des pics d'intensité plus marqués que ceux de la pluie de projet) et de leur succession chronologique en alternance avec les périodes de temps sec (les ouvrages peuvent ne pas être à leur capacité maximale de stockage au début d'un événement pluvieux).

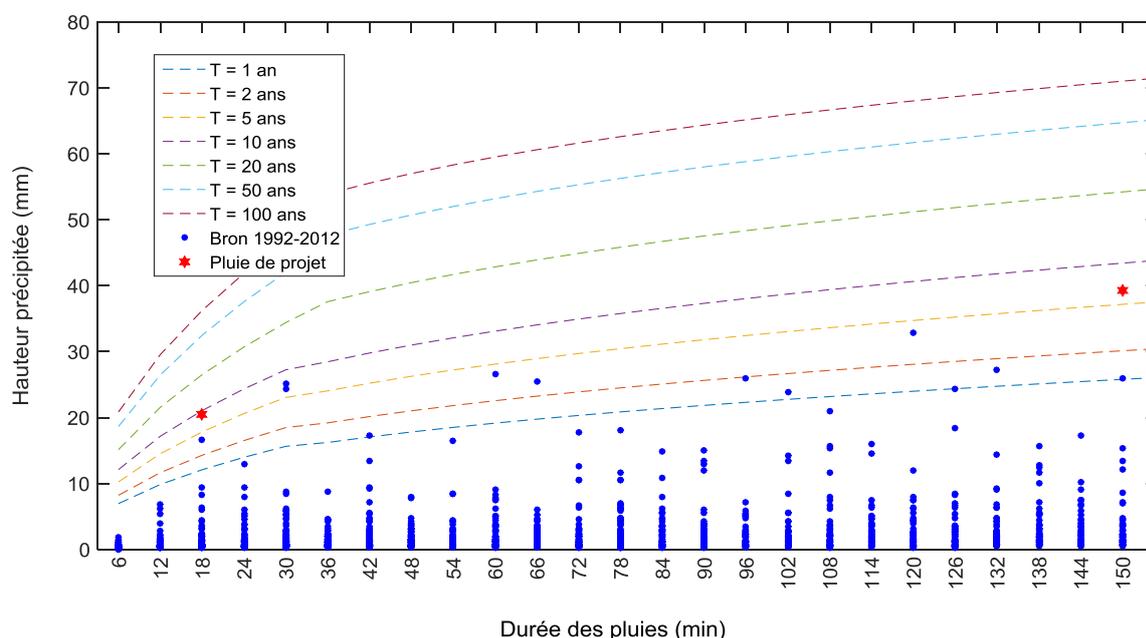


Figure 9. Diagramme durée – hauteur des événements pluvieux de la chronique 1992-2012 à Bron : zoom de la Figure 8 pour les pluies de durée de 6 à 150 minutes. Ajout de la pluie de projet (période intense sur 18 min et durée totale de 2h30 = 150 min).

1.3.2.2 Evaporation et évapotranspiration

Les séries chronologiques d'évapotranspiration potentielle ETP (mm/h) et d'évaporation EV (mm/h) sont construites à partir d'autres données climatologiques de base. Ces données ne sont pas toutes disponibles au même pas de temps ni pour toutes les années de la période 1992-2012, ce qui a nécessité l'établissement de profils annuels et journaliers types afin de construire des chroniques complètes sur les 21 années au pas de 6 minutes.

Pour le calcul de l'évaporation, les données disponibles sont les suivantes :

- température d'eau de surface θ : données OTHU à Chassieu (6.5 km de Bron, Grand Lyon) au pas de 2 minutes de 2004 à 2012 avec des lacunes.
- vitesse du vent w et humidité relative HR : données Météo France à Bron au pas horaire de 1992 à 2012.

Par sommation ou interpolation, ces données sont toutes ramenées au pas de temps de 6 minutes. Les données de température sont utilisées pour créer deux années types : une année normale et une année bissextile. On peut alors établir une chronique complète de l'évaporation estimée au pas de 6 minutes.

Pour le calcul de l'évapotranspiration, les données Météo France disponibles sont l' ETP calculée au pas journalier avec la formule de Penman-Monteith (Zotarelli *et al.*, 2014) de 1992 à 2012. Ne disposant pas des données nécessaires au calcul de l' ETP au pas horaire sur toute la période 1992-2012, nous faisons l'hypothèse que le profil journalier de l' ETP est similaire au

profil journalier de l'évaporation au pas de 6 minutes : les données d'ETP au pas journalier sont ainsi désagrégées au pas de 6 minutes, ce qui permet d'établir une chronique complète de l'évapotranspiration estimée à ce pas de temps.

Les données climatologiques à court pas de temps nécessaires aux simulations de certaines techniques alternatives sur des chroniques de longue durée appellent quelques commentaires. Le premier porte sur les séries pluviométriques, qui ne doivent pas être tronquées : tous les événements doivent être conservés dans la chronique, même ceux de hauteur précipitée inférieure à 2 mm (seuil fréquemment considéré comme celui en deçà duquel il n'y a pas de ruissellement ou de déversement) qui sont souvent négligés, avec raison, pour le *dimensionnement* classique des collecteurs alors qu'on s'intéresse ici à la simulation du *fonctionnement continu* de dispositifs soumis aux alternances de périodes sèches et pluvieuses très variables. Le deuxième concerne les séries d'évaporation et d'évapotranspiration : si des chroniques horaires de ces grandeurs ou des données nécessaires à leur calcul sont disponibles sur les dix dernières années dans la climathèque Météo France, les chroniques plus anciennes sont souvent au pas journalier et il est donc nécessaire de procéder à des désagrégations pour les pas de temps de l'ordre de la minute. De plus, elles sont moins nombreuses que les chroniques de pluie qui sont mesurées par différents acteurs, notamment les maîtres d'ouvrage des systèmes d'assainissement et leurs gestionnaires publics ou privés, depuis une trentaine d'années. Il est donc nécessaire pour ces opérateurs de renforcer et de multiplier les mesurages des grandeurs relatives à l'évaporation et l'évapotranspiration en mettant en place sur leurs installations des stations climatologiques complètes et pas uniquement des pluviographes.

1.4 CRITERES D'EVALUATION

Afin de comparer les trois scénarios sur la période 1992-2012, les critères suivants sont utilisés :

- la longueur des collecteurs et des noues
- le volume du bassin d'infiltration à l'exutoire du bassin versant
- l'emprise au sol des ouvrages
- les bilans hydrologiques annuels.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1 DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES

Les dimensionnements des trois scénarios sont présentés Tableau 2.

	Scénario S1	Scénario S2	Scénario S3
Longueur des collecteurs (m)	535	0	0
Longueur des noues (m)	0	408	203
Toitures végétalisées (m ²)	0	0	32 300
Bassin d'infiltration (m ³)	1 600	30	20
Emprise au sol des ouvrages d'infiltration (m ²)	1 067	1 040	521

Tableau 2. Dimensionnement des ouvrages pour les trois scénarios.

S1 génère un réseau de collecteurs publics enterrés sous voiries d'une longueur totale de 535 m. S2 et S3 génèrent des longueurs de noues implantées en bordure des voiries respectivement égales à 408 m et 203 m (les noues ont par hypothèse une largeur constante $B = 2.5$ m) et ne nécessitent aucun collecteur public sous voiries. Par contre, dans les trois scénarios, il est nécessaire d'amener les eaux de ruissellement depuis chaque parcelle soit jusqu'aux collecteurs soit jusqu'aux noues.

La réduction du ruissellement par les toitures végétalisées est clairement mise en évidence dans S3. La longueur de noues est divisée par un facteur deux par rapport à S2 : elle passe de 408 m à 203 m. Cette réduction de moitié est obtenue en supposant que les 32300 m² de toitures du bassin versant sont intégralement convertis en toitures végétalisées. Toute conversion moindre des toitures conduira nécessairement à une réduction moindre et proportionnelle de la longueur des noues. La ZA présente un coefficient d'imperméabilisation global très élevé, dont près de la moitié est dû aux toitures. Dans de nombreuses autres zones urbanisées, le coefficient d'imperméabilisation global peut être plus faible, mais la proportion des toitures dans l'imperméabilisation d'une zone urbanisée reste souvent comprise entre 40 et 60 %. Par conséquent, la réduction des volumes ruisselés due à la végétalisation des toitures reste sensiblement du même ordre de grandeur que celui déterminé dans cette étude de cas, sous réserve que les capacités de stockage et d'évapotranspiration des toitures végétalisées soient voisines de celles utilisées ici.

Le bassin d'infiltration à l'exutoire du réseau collecte nécessairement toutes les eaux ruisselées sur le bassin versant dans S1. Son volume est de 1600 m³ (pour une profondeur maximale avant débordement de 1.5 m). Dans S2, le ruissellement est très majoritairement infiltré par les noues et le volume du bassin à l'exutoire n'est plus que de 30 m³. Dans S3, la végétalisation des toitures permet de diviser par deux la longueur des noues qui infiltrent l'essentiel des autres eaux de ruissellement, le volume du bassin d'infiltration à l'exutoire étant encore réduit par rapport à S2 et estimé à seulement 20 m³. Avec une règle de

dimensionnement légèrement modifiée pour la dernière noue, il aurait été possible de supprimer complètement le bassin d'infiltration dans S2 et S3.

Dans S1, le bassin d'infiltration à l'exutoire représente la totalité de l'emprise au sol des ouvrages estimée à 1067 m². Dans S2, l'emprise au sol totale est de 1040 m², soit une valeur sensiblement identique : elle est essentiellement due aux noues implantées le long des voiries, la part liée au bassin d'infiltration étant marginale. Par rapport à S1, cette emprise au sol est toutefois de nature très différente : on passe d'un bassin d'infiltration nécessitant une parcelle spécifique et non valorisée à l'exutoire du bassin versant à des noues pouvant contribuer à la qualité paysagère de la zone artisanale. Dans S3, l'emprise au sol des noues est réduite de moitié (521 m²) par rapport à S2 grâce à la végétalisation des toitures. On augmente ainsi la surface utile de la zone tout en améliorant sa qualité paysagère.

La comparaison des coûts d'investissement et de fonctionnement des trois scénarios ne fait pas partie de cette étude de cas. Une analyse spécifique et approfondie est en effet nécessaire pour tenir compte des contextes, de la répartition des coûts entre partenaires publics (collectivité, maître d'ouvrage essentiellement pour S1) et privés (promoteurs ou entreprises installées sur la ZA pouvant prendre en charge une fraction des coûts dans S2 et S3), du recouvrement des coûts, de l'imputation des coûts d'entretien (service de l'eau pour S1, service des espaces verts pour les noues dans S2 et S3 et propriétaires privés pour les toitures dans S3 par exemple). Comment évaluer une valeur paysagère ? Quels sont les bénéfices additionnels liés aux toitures végétalisées (isolation thermique des bâtiments par exemple) ? Ces questions se posent de manière de plus en plus pressante pour les techniques alternatives souvent plurifonctionnelles et dont l'intégralité des coûts et des bénéfices ne peut relever du seul domaine de l'hydrologie.

2.2 SIMULATIONS DU FONCTIONNEMENT SUR 1992-2012 : BILANS HYDROLOGIQUES

Les 21 bilans hydrologiques annuels des trois scénarios sont présentés Figure 10.

Pour S1, les volumes V_{infB} annuels sortant du bassin versant correspondent aux volumes ruisselés et transportés par les collecteurs vers le bassin d'infiltration où ils sont infiltrés. Ils varient de 38260 m³ en 2011 à 61890 m³ en 1993 (valeur moyenne = 46940 m³) : la variabilité interannuelle est significative et reflète celle de la pluviométrie annuelle (Figure 7).

Pour S2, les volumes annuels sortant du bassin versant se répartissent entre quatre composantes : les volumes V_{infN} et V_{evN} respectivement infiltrés et évaporés par les noues, et les volumes V_{infB} et V_{evB} respectivement infiltrés et évaporés par le bassin d'infiltration. Les volumes totaux annuels varient de 38330 m³ en 2011 à 62010 m³ en 1993 (valeur moyenne = 47000 m³). Les très faibles écarts positifs par rapport aux volumes totaux dans S1 (écart moyen de + 0.13 % environ) sont dus à des différences de traitement entre Canoé® et le code Matlab, notamment la prise en compte des volumes précipités (sans pertes) sur les noues qui s'ajoutent à ceux précipités sur les autres surfaces imperméables prises en compte dans S1. Les volumes V_{infN} infiltrés par les noues sont largement prépondérants et du même ordre de grandeur que ceux infiltrés par le bassin d'infiltration dans S1. Pour seulement trois années (1997, 2000 et 2008), les volumes V_{infB} infiltrés par le bassin sont non négligeables et respectivement égaux à 791, 386 et 971 m³, soit 1.9 %, 0.8 % et 1.7 % des volumes totaux annuels correspondants. Sur les 21 années de la chronique, ils varient de 15 m³ à 971 m³ (valeur moyenne = 118 m³). Ils correspondent aux volumes déversés par la dernière noue aval du bassin versant et pourraient être infiltrés par celle-ci si on adaptait très légèrement la règle de dimensionnement de cette dernière noue. Les volumes annuels évaporés V_{evN} et V_{evB} sont insignifiants par rapport aux volumes annuels infiltrés : leur calcul n'est donc pas indispensable dans la modélisation des noues.

Pour S3, les volumes annuels sortant du bassin versant se répartissent entre cinq composantes : aux quatre composantes précédentes de S2 s'ajoutent les volumes V_{etpTV} évapotranspirés par les toitures végétalisées. Les volumes totaux annuels varient de 39430 m³ en 2011 à 64050 m³ en 1993 (valeur moyenne = 48740 m³). La légère augmentation des volumes annuels par rapport à S2 (écart moyen de +3.7 % environ) est due au fait que les précipitations sur les toitures végétalisées sont prises en compte intégralement dans S3 alors que les toitures classiques simulées avec Canoé® dans S1 et S2 sont affectées d'un coefficient de ruissellement de 0.95 (voir Tableau 1). Les volumes V_{infN} infiltrés par les noues varient de 19970 m³ en 2011 à 40410 m³ en 1993, soit une réduction respective de 48 % et 32 % par rapport à S2. Sur les 21 années de la chronique, la moyenne de V_{infN} est égale à 27170 m³ dans S3, soit une réduction moyenne de 42 % par rapport à S2. Cette réduction est obtenue grâce aux toitures végétalisées qui interceptent les eaux de pluie, les stockent puis les évapotranspirent, principalement durant les périodes de temps sec : les volumes évapotranspirés par les toitures varient de 17020 m³ en 2003 à 26130 m³ en 2008 (valeur moyenne = 21160 m³). Les volumes V_{etpTV} sont donc entièrement soustraits aux volumes ruisselés qu'il faut transporter puis infiltrer dans le bassin d'infiltration et/ou les noues dans les scénarios S1 et S2.

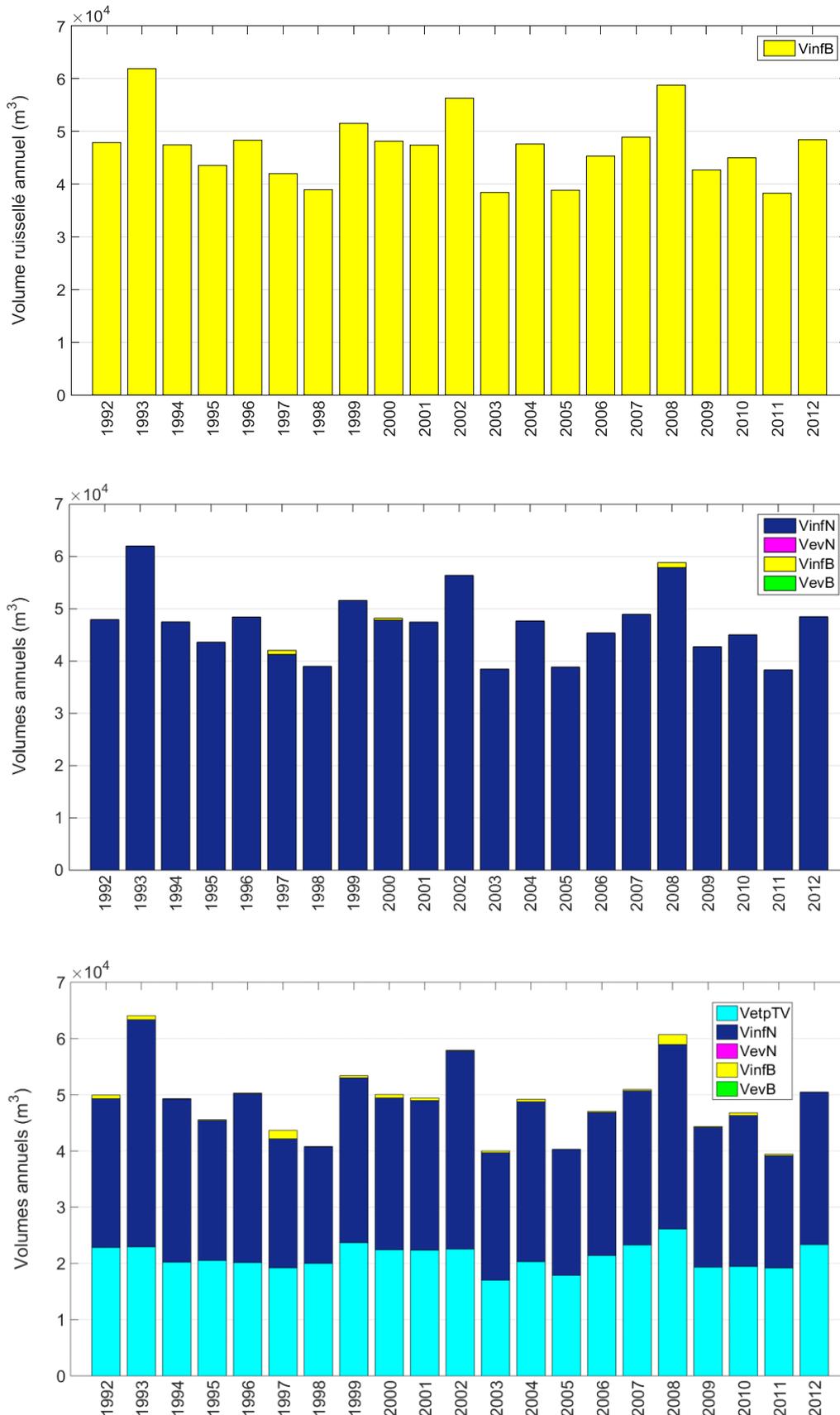


Figure 10. Bilans hydrologiques annuels pour les trois scénarios S1 à S3 du haut vers le bas.

Dans S3 comme dans S2, les noues sont dimensionnées pour la pluie de projet, mais les toitures végétalisées ne sont pas dimensionnées pour cette pluie dans S3 : elles sont simulées avec leur dimensionnement standard constructeur. On observe donc des surverses un peu plus fréquentes des noues dans S3, qui conduisent à solliciter un peu plus souvent le bassin d'infiltration à l'exutoire : les volumes V_{inFB} sont non négligeables pour 13 années sur 21. Sur l'ensemble de la chronique, ils varient de 38 m³ en 2005 à 760 m³ en 2008 (valeur moyenne = 420 m³, soit 0.9 % du volume total annuel moyen). Comme indiqué Tableau 2, le

bassin d'infiltration à l'exutoire joue un rôle minime dans S2 et S3, et une légère reprise du dimensionnement de la dernière noue rendrait ce bassin d'infiltration inutile.

2.3 COMPLEMENT POUR LE SCENARIO S1

A l'exutoire du bassin versant, le débit capable du dernier collecteur avant le bassin d'infiltration dans S1 est de $0.342 \text{ m}^3/\text{s}$. La chronique 1992-2012 comporte 7671 jours. Le débit à l'exutoire dans ce collecteur séparatif pluvial est nul pendant 7123 jours, soit 92.8 % du temps. Il est non nul (supérieur à $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) pendant 548 jours, soit 7.2 % du temps. La distribution cumulée du débit à l'exutoire pendant ces 548 jours est présentée Figure 11. Lorsqu'il est non nul, le débit à l'exutoire est inférieur à $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 90 % du temps, et inférieur au débit capable de la conduite pendant 99.8 % du temps. Le débit capable est donc atteint ou dépassé (mise en charge de la conduite) pendant 1.28 jours en 21 ans. La valeur maximale atteinte est égale à $1.23 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce type de graphique permet de synthétiser et de faire une analyse statistique des résultats de simulation pour de longues séries chronologiques, d'en tirer des enseignements sur le comportement du système et, le cas échéant, de reconsidérer des dimensionnements effectués avec une pluie de projet dont le choix comporte toujours une certaine part d'arbitraire.

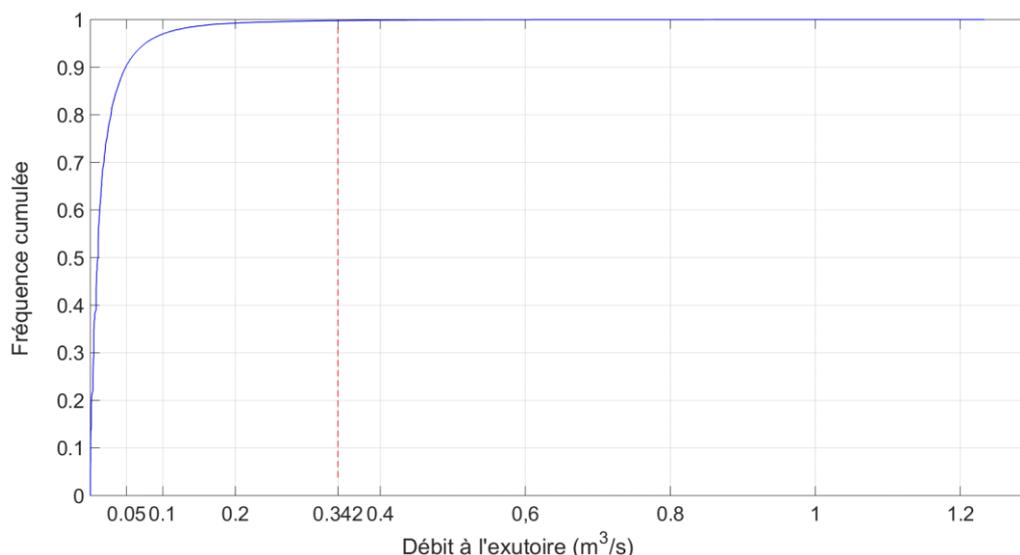


Figure 11. Distribution cumulée des débits à l'exutoire dans le scénario S1.

2.4 COMPLEMENT POUR LE SCENARIO S3

Les toitures végétalisées réduisent considérablement les volumes ruisselés vers les noues, comme indiqué Figure 10. Pour de nombreux événements pluvieux, la totalité de la précipitation est stockée dans la toiture puis évapotranspirée. Les toitures ne surversent vers les noues que lorsqu'elles sont saturées. Selon les épisodes antérieurs de temps sec et de temps de pluie, l'état initial et la capacité de stockage de la toiture végétalisée varient dans de grandes proportions, et il n'est donc pas possible d'indiquer quelle hauteur de précipitation peut être systématiquement interceptée par la toiture végétalisée (Bertrand-Krajewski et Vacherie, 2014).

La Figure 12 permet de comparer le comportement des toitures classiques (scénario 1) et végétalisées (scénario 3) dans le cas de l'événement pluvieux du 6 décembre 2006, pour la toiture TV1 du sous-bassin versant n° 1 dont la superficie est de 3834 m^2 . Cette pluie démarre le 05/12/2006 à 23:24 et se termine le 06/12/2006 à 11:54. Sa durée est de 756 minutes (12.6 heures) et sa hauteur est de 48 mm. D'après la Figure 8, sa période de retour est d'un peu moins de 2 ans.

Dans S1 et S2, le débit à la sortie de la toiture classique suit fidèlement l'évolution du hyétogramme. Dans S3, le débit à la sortie de la toiture végétalisée est nul jusqu'à 04:24 : les 15.6 mm précipités depuis le début de la pluie sont intégralement stockés par la toiture. A partir de 04:30, la toiture végétalisée surverse vers la noue n° 1, avec un débit voisin de celui de la toiture classique car elle se comporte alors quasiment comme une surface imperméabilisée. Les débits en sortie de toiture végétalisée sont un peu plus faibles que ceux sortant de la toiture classique : ce léger amortissement est dû au fait qu'une partie de l'eau précipitée, dans le modèle de toiture, continue à traverser le substrat par gravité avant d'être surversée vers la noue. En réalité, il devrait être plus marqué car le modèle ne tient pas compte explicitement du temps de concentration de la toiture végétalisée. Il aurait fallu pour cela construire un modèle spatialement distribué pour chacune des toitures végétalisées, ce qui n'a pas été fait dans cette étude de cas simplifiée. Néanmoins, de manière qualitative, la Figure 12 illustre clairement le comportement comparé des toitures classiques et végétalisées lors d'un événement pluvieux suffisamment important pour saturer la toiture végétalisée.

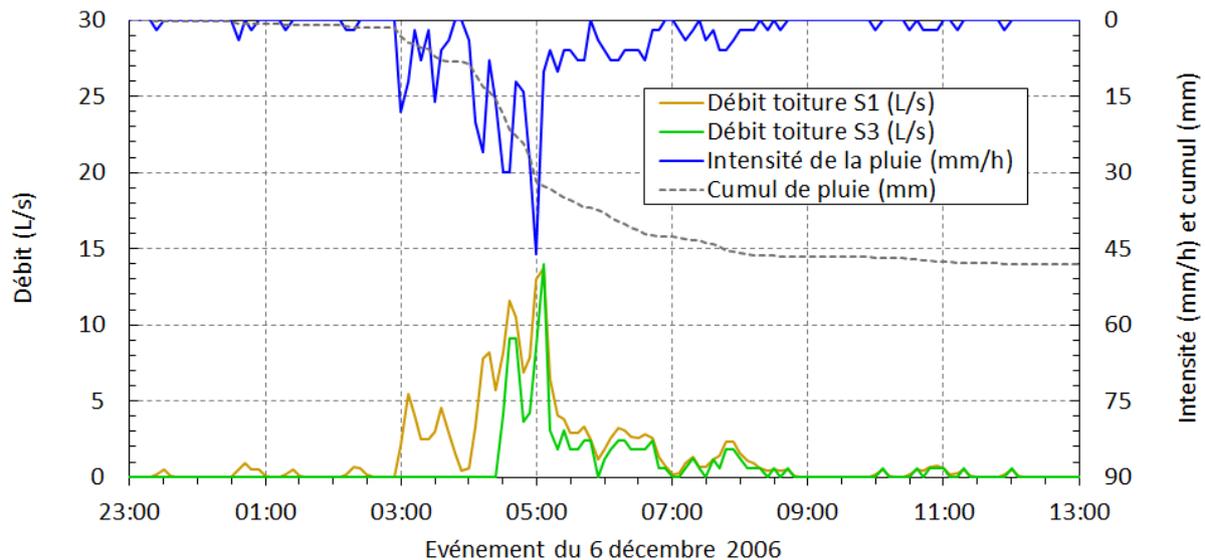


Figure 12. Débit en sortie de toiture du sous-bassin versant 1, événement du 6 décembre 2006, scénarios 1 et 3.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Trois scénarios de gestion des eaux pluviales sur une zone artisanale de 6.5 ha fortement imperméabilisée ont été étudiés :

- scénario 1 : réseau de collecteurs pluviaux avec un bassin d'infiltration aval,
- scénario 2 : noues d'infiltration en cascade le long des voiries,
- scénario 3 : toitures végétalisées et noues d'infiltration.

L'étude de cas montre que les trois scénarios présentent des différences très marquées. Dans le scénario 1, toutes les eaux sont collectées par un réseau séparatif pluvial comportant 535 m de conduites et acheminées vers un bassin d'infiltration aval de 1600 m³. Dans le scénario 2, toutes les eaux sont collectées et infiltrées dans des noues en cascade dont le linéaire total est de 408 m. Les emprises au sol du bassin d'infiltration du scénario 1 et des noues d'infiltration du scénario 2 sont similaires : 1067 m² et 1040 m² respectivement. Dans le scénario 3, les toitures sont entièrement végétalisées avec une capacité maximale de stockage de 32 mm, ce qui permet de diviser par deux le linéaire de noues d'infiltration par rapport au scénario 2. Les toitures végétalisées, par stockage temporaire et évapotranspiration des eaux de pluie reçues, jouent ainsi un rôle important dans le bilan hydrologique de la zone artisanale en réduisant très significativement (42 %) les volumes ruisselés.

Les ouvrages (sauf les toitures végétalisées) ont été dimensionnés dans cette étude de cas avec la pluie de projet de type double triangle utilisée pour le projet réel de la zone artisanale, avec une période de retour de 7 ans pour sa durée totale (39.2 mm en 2h30) et de 10 ans pour sa période intense (20.5 mm en 18 min). Le dimensionnement dépend donc étroitement du choix, toujours en partie arbitraire, d'une pluie de projet (forme, durée, période de retour, etc.). Cependant, un dimensionnement, quel qu'il soit, ne fournit que la taille des ouvrages : il ne permet pas de comprendre ni d'analyser leur fonctionnement en conditions dynamiques réelles, avec des successions de périodes de temps sec et d'événements pluvieux très variables. Des simulations continues sur des séries chronologiques de longue durée sont donc nécessaires. Une série chronologique de 21 ans (1992-2012) de précipitation et d'évapotranspiration au pas de temps de 6 minutes a été utilisée dans cette étude de cas : elle permet d'étudier de manière détaillée le fonctionnement hydrologique des ouvrages à toutes les échelles de temps (du pas de temps à l'événement, de l'événement à l'année et à l'échelle interannuelle), de procéder à des analyses statistiques (valeurs minimales, moyennes et maximales, distributions, fréquences et probabilités de dépassement des débits, hauteurs d'eau, mises en charge, rejets, débordements éventuels...), de s'intéresser à des événements particuliers au sein de la série chronologique, etc. Une analyse sur une série chronologique de durée suffisamment longue peut également conduire à modifier ou réviser un pré-dimensionnement en fonction des critères de performance et des niveaux de défaillance choisis.

Une simulation d'une année complète au pas de temps de 6 minutes, dans le cas du scénario 3 où il est nécessaire de faire appel à trois modèles différents (transformation pluie débit sur Canoé®, modèles Matlab des noues et des toitures végétalisées) ne nécessite que quelques minutes. Les temps de calculs ne peuvent donc pas être un frein à la modélisation de séries chronologiques de longue durée. Par contre, il est indispensable de développer de nouveaux outils opérationnels et logiciels de modélisation capables de représenter aussi bien les ouvrages classiques (collecteurs, bassins de retenue) que l'ensemble des dispositifs décentralisés ou de gestion à la source des eaux pluviales (noues, tranchées, chaussées poreuses, toitures végétalisées, etc.), afin que différents scénarios et variantes puissent être facilement étudiés et comparés afin de fournir des éléments pertinents d'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage. Ces nouveaux outils et logiciels devront intégrer de multiples échelles de temps (du pas de temps à l'échelle interannuelle) et d'espace (du bâtiment et de l'ouvrage décentralisé individuel géolocalisé au bassin versant complet) et des utilitaires d'analyse statistique des résultats. Des séries climatologiques (pluviométrie, température, ETP...) locales et à court pas de temps (quelques minutes) devront également être disponibles pour ces besoins croissants de modélisation en hydrologie urbaine.

Quelques messages clés

Les toitures végétalisées réduisent très significativement les volumes ruisselés. Elles divisent environ par deux la longueur des noues d'infiltration par rapport aux toitures classiques.

Infiltrer dans des noues ne réduit pas nécessairement l'emprise au sol des surfaces d'infiltration mais permet de libérer la parcelle du bassin d'infiltration et accroît la valeur paysagère de la zone à urbaniser.

Modéliser les ouvrages de plusieurs scénarios techniques par des séries chronologiques est indispensable pour en comprendre le fonctionnement à diverses échelles de temps et éventuellement en adapter le dimensionnement en fonction du niveau souhaité des indicateurs de performance.

La simulation de longues séries chronologiques est tout à fait réalisable, avec des durées de calcul de quelques dizaines de minutes par année simulée.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cet article a été effectué dans le cadre du groupe de travail « Eaux pluviales et aménagement » du GRAIE. Les auteurs remercient Stéphan Giol (SEDic) pour la mise à disposition des données et du modèle Canoé® de la zone artisanale et pour sa relecture du texte, la Communauté de Communes de la Plaine de l'Ain, Hervé Négro (Alison), Nicolas Invernou (Alison) et Bernard Chocat (INSA Lyon) pour leur aide à la modélisation sous Canoé®, Sylvie Barraud (INSA Lyon) et Stéphane Vacherie (INSA Lyon) pour leur aide à la modélisation des noues et des toitures végétalisées. Les données climatiques de Bron (69) ont été fournies par Météo France dans le cadre d'une convention avec DEEP pour les besoins en recherche et enseignement.

RÉFÉRENCES

- Bertrand-Krajewski J.-L., Vacherie S. (2014). *Projet ECCLAIRA – Rapport de fin de contrat – Partie INSA Lyon LGCIE-DEEP : suivi expérimental de la toiture végétalisée du Centre de Congrès de Lyon*. Villeurbanne (France): INSA Lyon, LGCIE-DEEP, Version finale révisée et actualisée 24 novembre 2014, 24 p.
- Brimo K., Bertrand-Krajewski J.-L., Grimard J.-C. (2013). A new in silico model predicting the hydrological behaviour of vegetated roof systems and components: development and verification with real environmental data collected over one year. *WGIC 2013 - World Green Infrastructure Congress*, Nantes, France, 9-13 September.
- Chocat B. (2009). *Rapport de recherche – Intensités extrêmes de pluie sur le territoire du Grand Lyon, analyse des données du Grand Lyon période 1987-2007*. Villeurbanne (France) : INSA Lyon, LGCIE, version corrigée avril 2009, 22 p. (non publié).
- Lencastre A. (1996). *Hydraulique générale*. Paris (France) : Eyrolles, 633 p. ISBN 2-212-01894-0.
- Llamas J. (1993). *Hydrologie générale : principes et applications*. Boucherville (Canada) : Gaëtan Morin éditeur, 527 p. ISBN 2-89105-485-7.
- Lozano C., Landry P. (2005). *Aménagement d'une zone d'activités Route de Charmoz, commune de Meximieux (01) - Etude de faisabilité géotechnique, missions géotechniques normalisées type G0 – G11*. Oyonnax (France) : Ain Géotechnique, rapport technique, décembre 2005, 12 p.
- Principato F., Piro P., Grimard J.-C., Bertrand-Krajewski J.-L. (2015). Test of a vegetated roof hydrological model with two experimental data sets. *Proceedings of the 10th UDM - International Conference on Urban Drainage Modelling*, Mont Sainte Anne, Quebec, Canada, 20-23 September, Oral Presentations I, 207-210.
- Zotarelli L., Dukes M.D., Romero C.C., Migliaccio K.W., Morgan K.T. (2014). *Step by step calculation of the Penman-Monteith evapotranspiration (FAO-56 method)*. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, document AE5-459, 10 p. (available at <http://edis.ifas.ufl.edu>).