



**HAL**  
open science

## Ville éponge – Et si on commençait par les toitures ?

Versini Pierre-Antoine, Ramanathan Arun, Schertzer Daniel, Sindt Lionel,  
Alicia Adrovic, Perrin Rémi

### ► To cite this version:

Versini Pierre-Antoine, Ramanathan Arun, Schertzer Daniel, Sindt Lionel, Alicia Adrovic, et al..  
Ville éponge – Et si on commençait par les toitures ?. NOVATECH, GRAIE, Jul 2023, Lyon, France.  
hal-04445087

**HAL Id: hal-04445087**

**<https://enpc.hal.science/hal-04445087>**

Submitted on 7 Feb 2024

**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.

## Sponge City – If we started with the roofs?

### Ville éponge – Et si on commençait par les toitures ?

Versini Pierre-Antoine<sup>1</sup>, Ramanathan Arun<sup>1</sup>, Schertzer Daniel<sup>1</sup>, Sindt Lionel<sup>2</sup>, Adrovic Alicia<sup>2</sup>, Perrin Rémi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> HM&Co, Ecole des Ponts, Paris, France, corresponding author: pierre-antoine.versini@enpc.fr

<sup>2</sup> Soprema, Strasbourg, France

#### RÉSUMÉ

Cette communication s'intéresse à la contribution des toitures végétalisées dans la mise en œuvre du concept de ville éponge. Pour ce faire et répondre ainsi à une contrainte locale « 0 rejet », un outil d'aide à la décision a été développé. Il comprend une méthode capable de simuler un ensemble de scénarios de pluie de référence caractérisés par des intensité, durée, fréquence, et tenant compte de la forte variabilité temporelle intra-événement. Il utilise ensuite un modèle hydrologique, tenant compte des propriétés géométriques et hydriques des différents éléments de la toiture, pour simuler la réponse d'une toiture végétalisée fictive à ces scénarios de pluie. Enfin un indicateur de performance permet d'optimiser la configuration de cette toiture pour qu'elle réponde au mieux aux réglementations locales de « 0 rejet ». Cet outil d'aide à la décision a été utilisé pour proposer des solutions répondant aux contraintes du zonage pluvial de la ville de Paris. Deux prototypes de toitures végétalisées expérimentales ont ainsi été mises en œuvre sur le toit de l'ENPC. Ils ont été densément instrumentés pour en suivre les bilans hydrique et énergétique. Les premiers résultats sont présentés ici. Ils montrent la capacité des 2 prototype à répondre quasi-systématiquement aux contraintes réglementaires.

#### ABSTRACT

This communication focuses on how to contribute to the constitution of a sponge city by using green roofs as a stormwater management tool. To do this and responding to a local "0 emission" constraint, a decision support tool was developed. It includes a method capable of simulating an ensemble of reference rainfall scenarios characterized by intensity, duration, frequency, and taking into account the strong intra-event temporal variability. Then, a hydrological model, taking into account the geometric and hydric properties of the various elements of the roof, makes it possible to simulate the response of a fictitious green roof to these rain scenarios. Finally, a performance indicator is used to optimize the configuration of the green roof so that it best meets local "0 emission" regulations. This decision support tool was used to propose solutions that meet the rain zoning constraints of the city of Paris. Two experimental prototypes were thus implemented on the roof of the ENPC. They were densely instrumented to monitor water and energy balances. We present here the first results showing the ability of the 2 prototypes to respond almost systematically to regulatory constraints.

#### KEYWORDS

Green roof, hydrological modelling, sponge city, zero emission

---

## 1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le concept de ville éponge s'est développé ces dernières années pour répondre aux enjeux du changement climatique (Hamidi et al., 2020). Il consiste à augmenter la capacité de rétention et d'infiltration du milieu urbain pour limiter le ruissellement et le risque inondation, tout en permettant un rafraîchissement local grâce à l'apport de la végétation. Cet objectif de rendre la ville plus résiliente peut se traduire réglementairement de différentes manières. La notion de « 0 rejet » est l'une d'entre elles. Elle consiste à demander à un aménageur d'infiltrer et/ou de stocker sur place l'intégralité des eaux pluviales, ou plus souvent une portion plus ou moins importante d'un événement pluvieux de référence (abattement). En France, la densité importante des villes nécessite de réfléchir à des solutions innovantes pour répondre à ces contraintes de « Rejet 0 » dans une perspective de future ville éponge. C'est à cette fin qu'un partenariat de recherche collaborative s'est noué entre l'entreprise SOPREMA et le laboratoire Hydrologie, Météorologie et Complexité de l'Ecole des Ponts ParisTech (HM&Co-ENPC). Concrètement, il vise à développer un outil d'aide à la décision pour dimensionner une toiture végétalisée répondant aux contraintes locales de « 0 rejet ». La présente communication illustre le travail réalisé sur la ville de Paris et ayant débouché à la mise en œuvre de 2 prototypes expérimentaux.

## 2 METHODE ET OUTILS

Le développement de cet outil d'aide à la décision, capable de proposer une solution optimale de « 0 rejet » en toiture (complexe drainage/substrat/végétation et possible réutilisation de l'eau), s'est articulé autour de 3 étapes : (i) détermination d'un ensemble d'événement pluvieux de référence, statistiquement plausible et à même de représenter la grande variabilité temporelle des précipitations, (ii) simulation des processus d'infiltration, d'écoulement, d'évapotranspiration et de stockage dans les différentes couches d'une toiture végétalisée à l'aide d'un modèle hydrologique utilisant ces scénarios de pluie de référence, (iii) proposition d'un indicateur de performance à même d'évaluer les sorties du modèle hydrologique en regard d'une réglementation « 0 rejet » et de permettre le choix d'une solution pertinente.

### 2.1 Détermination d'une pluie de référence

Dans un premier temps, une méthode a été développée (Ramanathan et al., 2021) pour simuler des chroniques de pluie contenant des événements pluvieux de références caractérisés par des intensité, durée et fréquence données (P, D, T). En effet, un état de l'art a montré que la notion de « 0 rejet » faisait généralement référence à la capacité d'un système à absorber un événement pluvieux de référence pendant une certaine durée (laissant la possibilité d'évacuer l'eau dans le réseau après celle-ci). Pour ce faire, un processus de cascade multiplicative reposant sur les multifractales universelles (Schertzer and Lovejoy, 2011) a été utilisé. Les données de précipitation quotidiennes, horaires et à six minutes de Météo France ont été utilisées et analysées pour en étudier le régime scalant et déduire les paramètres ( $\alpha$ ,  $C_{-1}$ ) requis pour effectuer des simulations multi-échelles. Des constantes de renormalisation appropriées qui correspondent aux valeurs des P, D, T de l'événement de référence sont ensuite utilisées pour simuler un ensemble de scénarios de précipitations (10 chroniques longues de plusieurs dizaines d'années) et contenant un nombre d'événements de référence statistiquement cohérent.

### 2.2 Développement d'un modèle de dimensionnement

Dans un second temps, un modèle a été développé pour simuler le comportement hydrologique d'une toiture végétalisée (substrat et drainage) en fonction de leurs propriétés mécaniques et hydrauliques (granulométrie du substrat, porosité, conductivité hydraulique, épaisseur...). La modélisation du substrat s'inspire des travaux de thèse de Filip Stanic (Stanic et al., 2020). L'impact de la végétation n'étant pas explicitement pris en compte ici, les solutions obtenues peuvent être considérées comme des prototypes de base dont les performances réelles devraient être supérieures. Ce modèle est appliqué sur les 10 scénarios de chroniques longues de précipitations contenant les événements de référence.

### 2.3 Indicateur de performance

Enfin, un indicateur de performance (ZEM pour « Zero Emission Metric ») a été défini pour vérifier que le débit en sortie de la toiture végétalisée est conforme à la réglementation « 0 rejet » choisie :

$$ZEM (\%) = \frac{1}{10} \sum_{me=1}^{10} \frac{N_{me,0}}{N_{me}} \times 100 \quad (1)$$

Où  $N_{me}$  est le nombre total d'événements pluvieux de référence contenu dans un scénario, et  $N_{me,0}$  le nombre d'événements pluvieux de référence pour lesquels la contrainte de 0 rejet est respectée.

### 3 PRESENTATION DES RESULTATS NUMERIQUES

L'outil d'aide à la décision a été mis en œuvre sur la ville de Paris. Dans son zonage pluvial, la réglementation « 0 rejet » se traduit par la définition de 4 zones sur lesquelles il y a obligation de retenir respectivement 4, 8, 12 et 16 mm pendant 24 heures pour un événement de référence. Ce dernier correspond à un cumul de précipitation de 16 mm sur une durée de 4 heures, correspondant à une période de retour de 6 mois.

Un ensemble de 10 scénarios de pluie contenant des événements de référence - caractérisés par ces valeurs de P, D, T - a ainsi été déterminé à l'aide des cascades multiplicatives. Cet ensemble permet de tenir compte de la grande variabilité temporelle des précipitations (cf. Figure 1) avec parfois des pics d'intensité atteignant 40 mm/h. Ces scénarios ont ensuite été introduits en entrée du modèle hydrologique. Différentes configurations ont pu être testées, et pour chacune d'elle l'indicateur de performance ZEM calculé. La figure 1 (droite) montre qu'il a ainsi été possible de déterminer des valeurs optimales des caractéristiques de la toiture végétalisée (épaisseur des couches de drainage, asservissement d'un débit de fuite) pour obtenir des valeurs de ZEM supérieures à 85%. Ce seuil a été choisi comme un compromis acceptable pour fournir une solution réaliste, tant techniquement qu'économiquement, tout en répondant à la contrainte réglementaire dans la quasi-totalité des situations.

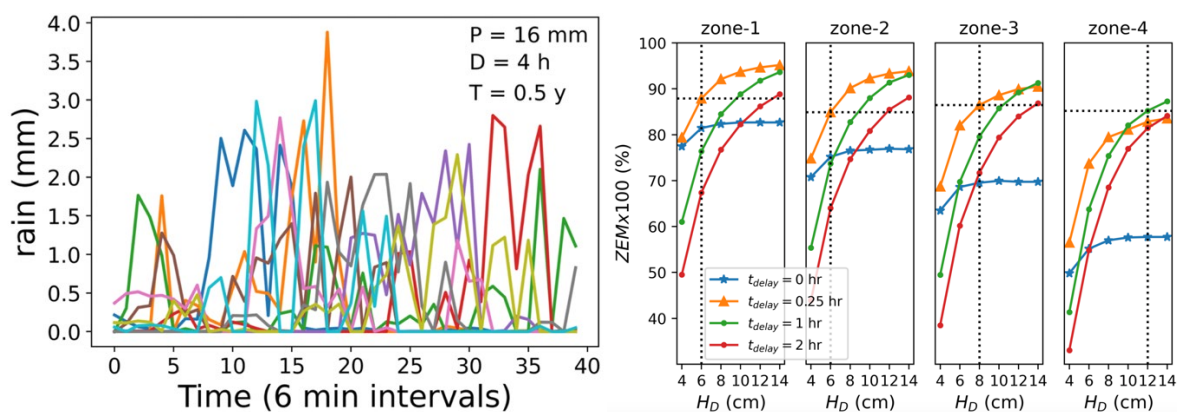


Figure 1. Ensemble de 10 événements de référence simulés (gauche) et calcul de l'indicateur de performance ZEM pour les 4 zones du zonage pluvial en fonction de la hauteur de la couche de drainage ( $H_D$ ) et de la durée de l'ouverture de l'orifice de débit de fuite ( $t_{delay}$ )

### 4 MISE EN ŒUVRE DE PROTOTYPES EXPERIMENTAUX

Sur la base de ces résultats numériques, 2 prototypes expérimentaux ont été mis en œuvre sur le toit de l'ENPC, correspondant réciproquement aux configurations déterminées pour les zones 1 et 4 du zonage pluvial de Paris (Figure 2, gauche), et comprenant une couche de drainage de type RETENTIO®, une couche de substrat et un couvert végétal composé de différentes espèces. Un certain nombre de capteurs y a été installé pour suivre les bilans hydrique et énergétique : lysimètre, hauteur d'eau dans la couche de drainage, teneur en eau dans le substrat, débit de surverse, température, bilan radiatif, et pluviométrie. Les données collectées doivent permettre de valider par l'expérience les résultats de simulation, mais aussi de mieux comprendre le fonctionnement thermo-hydrique de ces complexes drainage/substrat/végétation pour en améliorer la modélisation.

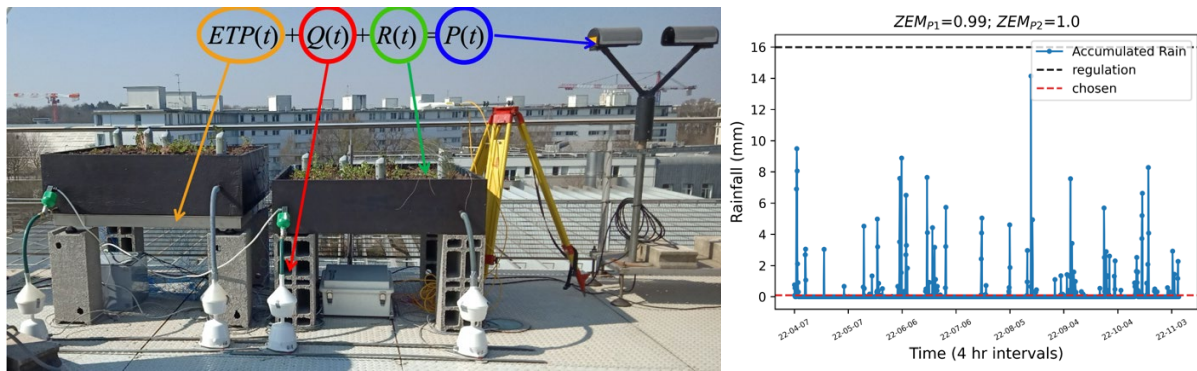


Figure 2. Prototypes expérimentaux mis en œuvre sur le toit de l'ENPC : lysimètre mesurant l'évapotranspiration en orange, débit en rouge, teneur en eau du substrat en vert et précipitation en bleu à l'aide d'un disdromètre

Opérationnels depuis mars 2022, les 2 prototypes ont pour l'instant parfaitement répondu à la contrainte réglementaire avec des valeurs de ZEM réelles de respectivement 99% et 100% ; valeurs calculées pour l'ensemble des événements pluvieux survenus pendant la période d'étude. En effet, il est à noter que jusqu'à maintenant, aucun événement n'a dépassé la valeur de référence de 16 mm sur une durée de 4h (Figure 2, droite).

## 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'outil d'aide à la décision développé a ainsi montré son aptitude à dimensionner des solutions « 0 rejet » en toiture en tenant compte des spécificités locales, que ce soit en termes de réglementation à mettre en œuvre, que de climat (des travaux similaires ont été réalisés pour les villes de Brest et Strasbourg, ainsi que sur l'île de la Réunion).

Il s'agit désormais d'inscrire ce travail dans la durée avec d'une part la poursuite du suivi des prototypes expérimentaux pour s'assurer de la pérennité de la solution proposée dans le temps, et d'autre part de se projeter dans un futur plus ou moins proche pour s'intéresser au changement climatique et à son impact sur la définition de solutions « 0 rejet ». Pour ce faire, il est prévu d'appliquer l'outil d'aide à la décision sur de nouveaux événements pluvieux issus des projections climatiques.

## LIST OF REFERENCES

- Hamidi, A., Ramavandi, B., Sorial, G.A. (2021). *Sponge City — An emerging concept in sustainable water resource management: A scientometric analysis*. Resources, Environment and Sustainability, 5, 100028, <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100028>.
- Ramanathan, A., Versini, P.-A., Schertzer, D., Perrin, R., Sindt, L., and Tchiguirinskaia, I. (2021). *Stochastic simulation of reference rainfall scenarios for hydrological applications using a universal multifractal approach*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2021-580>
- Schertzer, D. and Lovejoy, S. (2011) *Multifractals, generalized scale invariance and complexity in geophysics*. International Journal of Bifurcation and Chaos, 3417-3456, doi: 10.1142/S0218127411030647.
- Stanić, F., Delage, P., Tchiguirinskaia, I., Versini, P.-A., Cui, Y.-J. and Schertzer, D. (2020). *A New Fractal Approach to Account for Capillary and Adsorption Phenomena in the Water Retention and Transfer Properties of Unsaturated Soils*. Water Resour. Res., 56(12), e2020WR027808, <https://doi.org/10.1029/2020WR027808>