

Gestion à la parcelle des eaux pluviales: étude d'une toiture végétalisée, bilan et retour d'expérience

Stormwater management at the local scale: a green roof study, review and lessons learned

Ion Iorgulescu, Michel Enggist, Pascale Nirel, Mathieu Coster

Etat de Genève, ion.iorgulescu@etat.ge.ch, michel.enggist@etat.ge.ch,
pascale.nirel@etat.ge.ch, mathieu.coster@etat.ge.ch

RÉSUMÉ

Le Canton de Genève (Suisse) promeut une politique de gestion des eaux pluviales et de ruissellement à la parcelle pour mieux maîtriser les crues de cours d'eau traversant des zones fortement urbanisées. Afin de documenter le principe des toitures végétalisées, nous avons étudié le cas du Cycle d'Oriental (groupe scolaire) de la Seymaz (commune de Thônex) d'une surface de près d'un hectare en prairie sur une épaisseur de substrat d'environ 20 [cm]. Le rejet de ce dispositif s'écoule dans la rivière de la Seymaz dont le tronçon aval est caractérisé par un habitat dense. L'étude repose sur le suivi des précipitations locales et des débits écoulés de cette toiture sur une période de 5 ans depuis la construction du bâtiment en 2007. L'analyse a permis une évaluation de l'efficacité réelle d'un cas pratique de toiture végétalisée comme outil de gestion de l'eau, ainsi qu'une quantification de son impact sur le régime hydrique du milieu récepteur. Les résultats montrent la capacité du système étudié d'absorber des pluies d'intensités et de volumes ayant des temps de retour supérieurs à deux ans qu'un drainage appréciable ne se produise. Par contre, lorsque la capacité de stockage du substrat est épuisée, on assiste à un effet seuil avec un taux de conversion précipitation-écoulement proche de l'unité. L'atténuation des débits de pointe reste toutefois supérieure à celle d'une toiture conventionnelle. Compte tenu que l'historique du forçage climatique à plus long terme (jours à dizaines de jours) est déterminant pour la réponse du système, nous proposons comme outil de d'évaluation et de dimensionnement un modèle hydrologique simple mais robuste. Ce modèle est capable de fournir, par simulation sur de longues séries de données d'entrée, des statistiques de volumes et débits de drainage. En outre, une étude préliminaire de la qualité de l'eau débutée en 2012 n'a montré aucune contamination par des herbicides; ainsi, la qualité de l'eau qui s'écoule de la toiture est jugée suffisante pour retourner au milieu naturel.

ABSTRACT

The Geneva Canton (Switzerland) promotes a stormwater management policy at the plot scale aiming at better controlling/mastering the floods in densely urbanised areas. With the aim of better documenting the green roof approach, we studied the case of the Seymaz High school (Thônex commune), a building with a green roof surface of nearly one hectare and a substrate depth of 20 cm. The study is based on the continuous monitoring of local precipitations and outflow from the roof over a five-year period starting in 2007 when the construction was finished. The analysis allowed the evaluation of the actual effectiveness of a concrete example of green roof as a tool for water management as well as a quantification of its impact on the receiving waters. The results demonstrate system's capacity to absorb high-intensity, high-volume rainfalls having a return period of over two years without a sizeable drainage at the outlet. On the contrary, when substrate's storage capacity is exhausted a threshold effect is taking place with precipitation-to-discharge conversion rates approaching unity. The attenuation of peak-flows remains nevertheless better than that of a conventional roof. As the history of climate forcing on a longer period (days to tens of days) is determining system's response, we propose as an assessment and evaluation tool a simple but robust hydrological model. This model is able to provide statistics of drainage volumes and discharges by simulation on long series of input data. Moreover, a preliminary water quality study didn't show any contamination by herbicides and the quality of the drainage water is considered as sufficient for being returned to the natural environment.

MOTS CLES

Bilan hydrique, Etude de cas, Genève, Gestion des eaux pluviales, Modélisation, Quantité et qualité des eaux, Toiture végétalisée

1 INTRODUCTION

Les toitures végétalisées remplissent de multiples fonctions environnementales, économiques et sociales. Elles peuvent être considérées comme un instrument privilégié en faveur du développement durable des agglomérations urbaines. La fonction de rétention de l'eau est généralement jugée comme une des fonctions principales. Les bases scientifiques et techniques nécessaires pour la conception et l'évaluation de l'efficacité des toitures dans différents contextes commencent à être disponible dans la littérature (entre autres: De Cuyper et al., 2006; Mentens et al., 2006). Le Canton de Genève (Suisse) s'est engagé à mettre en œuvre une politique de gestion des eaux pluviales et de ruissellement à la parcelle pour mieux maîtriser les crues de cours d'eau traversant des zones fortement urbanisées. Les recommandations actuellement en vigueur (Etat de Genève, 2004) imposent une gestion des eaux pluviales à la parcelle avec une limite de rejet de 10 [l/s/ha] (équivalent à 3,6 [mm/h] en débit instantané) pour un temps de retour de 20 ans. Un nombre croissant de projets qui comportent une toiture végétalisée voient le jour. Un projet de cartographie par télédétection (Massy et al., 2011) en a identifié 381 pour la ville de Genève seule (0,6% du nombre total de bâtiments). Afin de documenter l'effet sur la quantité et la qualité des eaux des toitures végétalisées dans un contexte genevois, nous avons étudié le cas du Cycle d'Orientation (groupe scolaire) de la Seymaz (commune de Thônex), projet qui a été achevé en automne 2007. Il s'agit d'un projet de grande envergure, un des plus importants à l'échelle genevoise voire suisse, car il consiste en une surface de toiture végétalisée de presque neuf mille mètres carrés.

2 DESCRIPTION DU SITE

2.1 Eléments constructifs

La toiture végétalisée est construite selon un schéma typique (voir Figure 1 ci-dessous). Elle est constituée (i) d'un substrat de 20 à 23 [cm] (mesuré in situ) d'épaisseur de terre végétale ayant une texture limoneuse et provenant des horizons supérieurs du sol présent sur le site avant la construction, (ii) d'une couche filtrante en géotextile, (iii) d'une couche drainante de 10 [cm] en argile expansée et (iv) d'une étanchéité en PVC ayant également le rôle d'anti-racine. Le système de drainage est complété par un réseau de tubes perforés qui acheminent les eaux vers 10 conduites verticales, réparties sur la toiture de telle manière à pouvoir drainer chacune un dixième de la superficie totale qui est égale à 8770 [m²]. Afin de respecter la recommandation genevoise pour la gestion de l'eau, un vortex d'une capacité maximale théorique de 0.9 [l/s] est installé en tête de conduite (voir Figure 1 panneau de droite). L'écoulement se produit dès qu'une hauteur d'eau dans la couche drainante atteint 5 [cm].

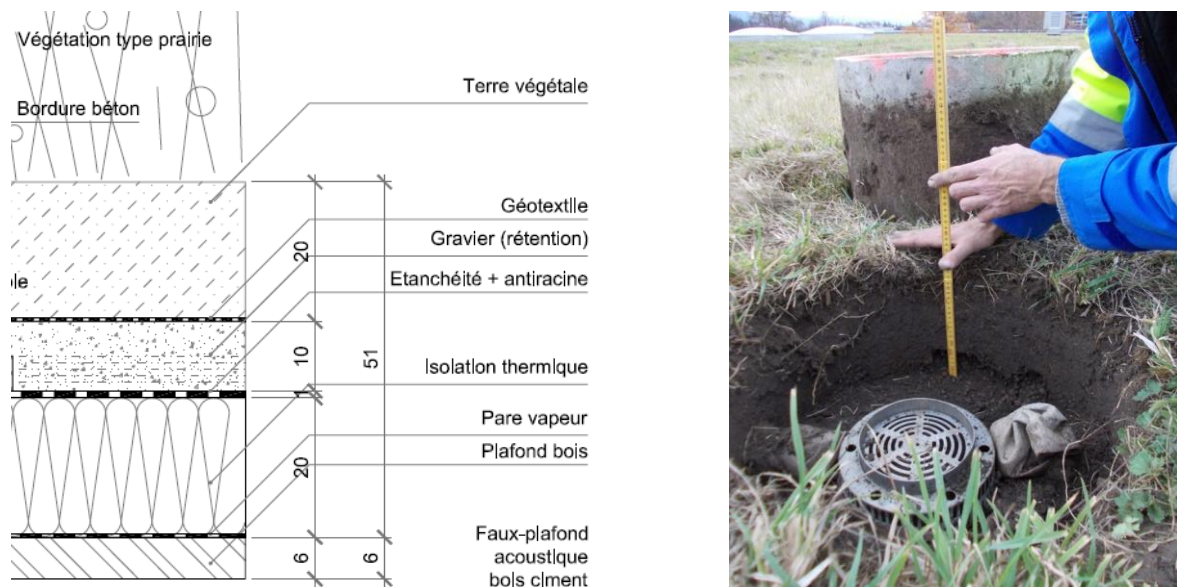


Figure 1 Section type selon projet et réalisation in situ avec organe de contrôle des débits (Vortex)

Après sa mise en place, le substrat a été ensemencé en graines extensives, semis type UFA terrasse 49 CH à raison de 0.5 [g/m²]. Aucun engrais n'est appliqué. Deux fauches par an sont prévues avec une division de la surface en plusieurs secteurs et une rotation sur trois ans de ces derniers afin de favoriser le développement d'une flore et d'une faune diversifiée.

2.2 Equipement hydrométéorologique

Les précipitations sont mesurées à l'aide un pluviographe à augets basculants type Ketterer (All) situé sur la toiture (voir Figure 2 panneau de gauche) et relié à un enregistreur de type MADD produit par MADD Technologies (CH) . Les débits d'eau restitués par la toiture sont déterminés à l'aide des niveaux d'eau mesurés dans un Venturi DN 200 [mm] produit par Züllig (CH) à l'aide d'une sonde ultrasonique de type Probe aussi produite par MADD Technologies (voir Figure 2 panneau de droite) et reliée à un enregistreur MADD. Les niveaux sont transformés en débits à l'aide d'une courbe de tarage fournie par le constructeur du Venturi.



Figure 2 Equipement: pluviographe à augets basculants et Venturi avec mesure par radar.

L'évapotranspiration potentielle a été obtenue à partir des mesures faites sur le réseau Agrometeo (<http://www.agrometeo.ch/>) mis en place par les services de la Confédération suisse.

2.3 Climat de la région genevoise

Le climat du bassin genevois peut être qualifié de tempéré humide. Les précipitations moyennes annuelles qui avoisinent 960 [mm] sont uniformément réparties pendant l'année. L'évapotranspiration moyenne annuelle varie autour de 600 [mm] et présente un fort caractère saisonnier. Les moyennes mensuelles de l'évapotranspiration dépassent celles des précipitations de mai à août. Cet aspect est significatif dans le contexte des toitures végétalisées car les précipitations orageuses intenses sont la motivation principale pour la gestion de l'eau à la parcelle et se produisent particulièrement durant ces mois d'été. Nous pouvons donc nous attendre à une bonne efficacité de la rétention des orages estivaux dans la zone racinaire suivie par leur retour rapide à l'atmosphère grâce à une évapotranspiration intense. Il convient toutefois de noter que les précipitations présentent une forte variabilité interannuelle (représentée dans la Figure 3 par l'écart type des séries annuelles).

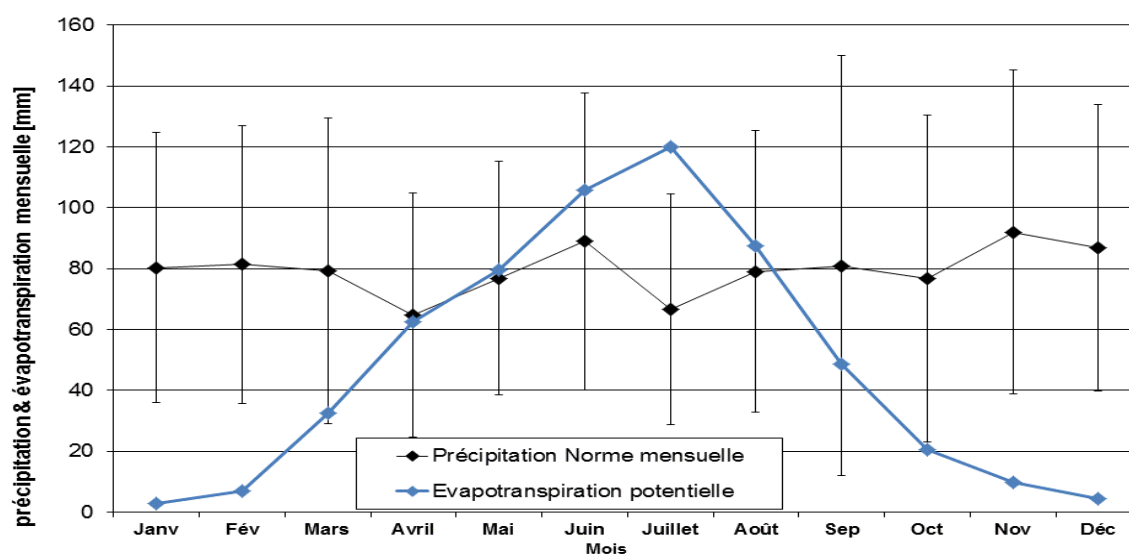


Figure 3 Moyennes mensuelles de la précipitation et de l'évapotranspiration à Genève (source Meteosuisse).

Le tableau ci-dessous présente l'intensité des précipitations pour divers temps de retour et durées établies pour la région genevoise suite à l'analyse des mesures disponibles (Etat de Genève, 2011).

Tableau 1. Intensité des précipitations [mm/h] en fonction de la durée et du temps de retour pour le Genevois.

Durée [min]	Temps de retour [années]					
	2	5	10	20	30	50
10	77.40	94.90	108.00	121.00	129.00	139.00
60	23.20	28.30	32.20	36.10	38.30	41.20
360	6.76	8.16	9.21	10.30	10.90	11.70
1440	2.60	3.12	3.50	3.89	4.12	4.40

3 ANALYSE DE LA RÉPONSE HYDROLOGIQUE

3.1 Comportement à l'échelle annuelle

Le Tableau 2 ci-dessous présente les principaux éléments du bilan hydrologique des années 2008 à 2011. On constate ainsi que l'écoulement annuel représente une fraction inférieure à 30% des précipitations. Il convient de noter toutefois que trois de ces quatre années ont été sèches, seule l'année 2008 étant caractérisée par des précipitations proches des normes. Il est toutefois intéressant de noter que même si les mois d'été ont été mieux arrosés, avec des valeurs de précipitations proches voire supérieures aux moyennes, les écoulements mesurés ont été faibles. Ils représentent tout au plus quelques pourcents des précipitations pour la période correspondante. Quelque peu surprenant, les volumes écoulés les plus importants ont été enregistrés pendant l'été 2011, année qui a été sur l'ensemble particulièrement sèche. Ce comportement est dû à des précipitations très abondantes (115 mm) entre le 7 et le 21 juillet. Le Tableau 2 donne des indications sur l'efficacité de la toiture végétalisée qui se montre capable de réduire fortement les écoulements en saison estivale.

Tableau 2. Précipitation, évapotranspiration et écoulement [mm] pendant les années 2008 à 2011.

Année	Précipitation annuelle	Précipitation juin-août	ETP (Agrometeo)	Écoulement annuel	Écoulement juin-août
2008	968	241	590	265*	17.2
2009	763	292	750	170	9.9
2010	710	162	670	130	0.4
2011	605	266	710	160	32.1

3.2 Comportement à l'échelle saisonnière

Le comportement à l'échelle saisonnière est illustré par deux périodes contrastées qui permettent d'appréhender le fonctionnement hydrologique du système.

Une première période, caractérisée par une évapotranspiration intense et des précipitations du même ordre de grandeur, comprend les mois de juillet et d'août 2009 et démontre la capacité de la toiture végétalisée à stocker de 55 à 65 [mm] de précipitations orageuses estivales et de les évaporer dans les 10 à 15 jours qui suivent. La Figure 4 ci-dessous illustre les précipitations et débits mesurés à un pas de temps horaire pendant cette période. La précipitation totale enregistrée pendant ces deux mois est de 234 [mm] ce qui représente autour de 150% de la norme pour cette période de l'année. Une intensité maximale horaire de 25 [mm/h] a été enregistrée dans la nuit du 7 au 8 août alors qu'un maximum de 66 [mm] sur 24 heures a été enregistré les 24 et 25 août. Ces intensités correspondent à des événements ayant des temps de retour entre 2 et 4 ans. L'évapotranspiration potentielle pour cette période a été estimée par calcul à 220 [mm] et est du même ordre de grandeur que les précipitations totales. La lame écoulée totale pour cette période est de 10 [mm], c'est-à-dire moins de 5% de la précipitation complète. Le débit horaire maximal est autour de 0,2 [mm/h], c'est-à-dire moins de 1% de l'intensité horaire extrême, alors que la lame maximale écoulée en 24 [h] est inférieure à 3 [mm] ce qui représente 5% de la lame maximale précipitée sur un même intervalle.

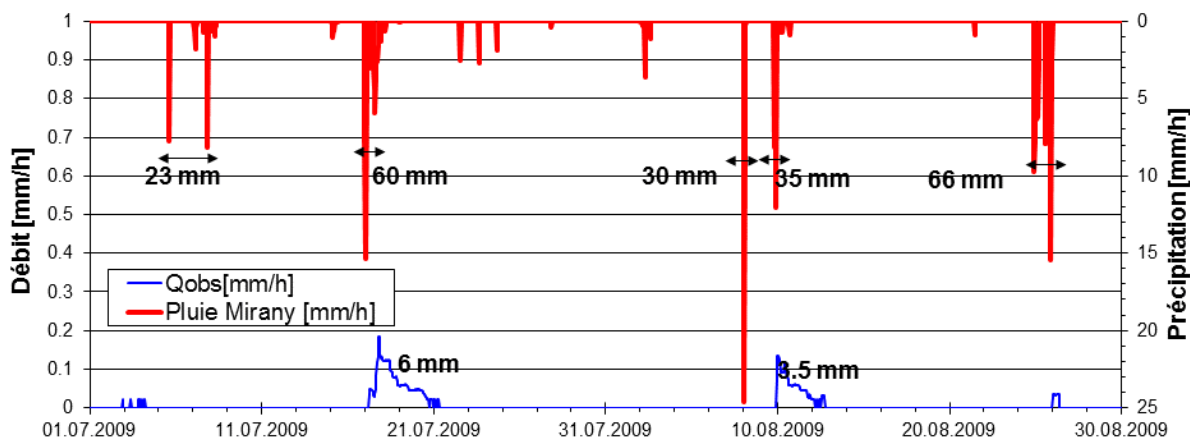


Figure 4 Précipitations et débits mesurés dans la période juillet-août 2009.

Au contraire, la seconde période, du 1^{er} au 20 septembre 2008 (Figure 5), illustre la réponse de la toiture en conditions humides. Une succession rapprochée d'événements, accompagnés d'une évapotranspiration potentielle plus réduite, fait que la capacité du système à stocker et à rendre l'eau à l'atmosphère est dépassée. Ainsi, entre le 1^{er} et le 15 septembre, il tombe plus de 170 [mm] de précipitation, ce qui représente presque 4 fois la norme pour cette période. Les intensités horaires maximales de 9 à 11 [mm/h] correspondent à des événements très fréquents et les précipitations maximales sur 24 heures (52 [mm]) représentent seulement un événement annuel. L'évapotranspiration pendant cette période est de seulement 35 mm mais le stock du sol est vidé car, durant la période qui a précédé, les précipitations ont été réduites et l'évapotranspiration plus importante. On remarque ainsi que 60 [mm] de précipitation sont absorbés avant que l'écoulement ne se produise. L'écoulement mesuré sur la période totalise 62 [mm] avec une intensité maximale horaire de 3,4 [mm/h] et un écoulement maximal sur 24 h égal à 23 [mm]. Par ailleurs, l'événement des 6 et 7 septembre 2008 est le plus important enregistré pendant la période de mesure. Il est aussi possible, voire vraisemblable, que les valeurs de débit soient sous-estimées car un élément du système d'évacuation des eaux de la toiture - un dispositif de filtration muni d'une surverse - a probablement déversé pendant cette période. Les volumes déversés ont ainsi échappé au dispositif de mesure du débit

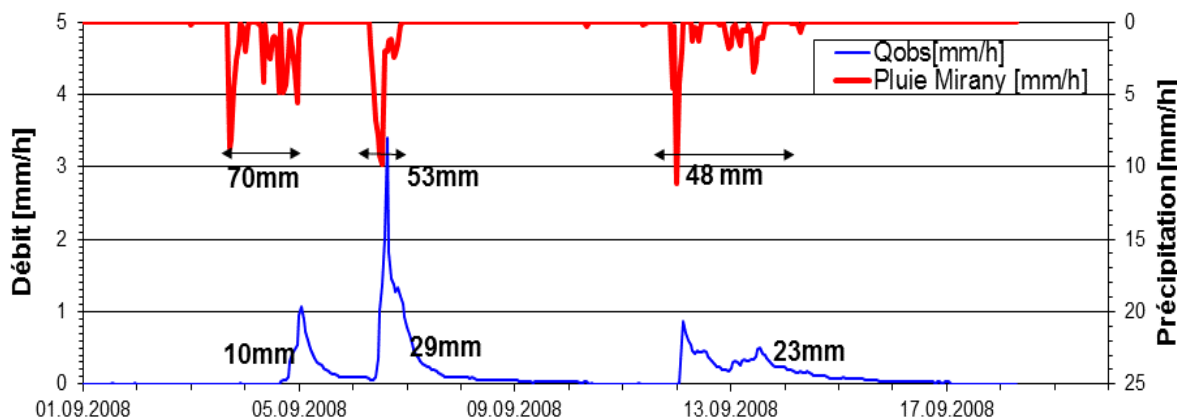


Figure 5 Précipitation et réponse hydrologique de la toiture végétalisée pour le mois de septembre 2008.

3.3 Comportement à l'échelle événementielle, événements remarquables

La réponse à l'échelle événementielle est illustrée à l'aide des deux plus importants événements enregistrés pendant la période de mesure: les 6 et 7 septembre 2008 et du 9 au 11 novembre 2012 (Figure 6).

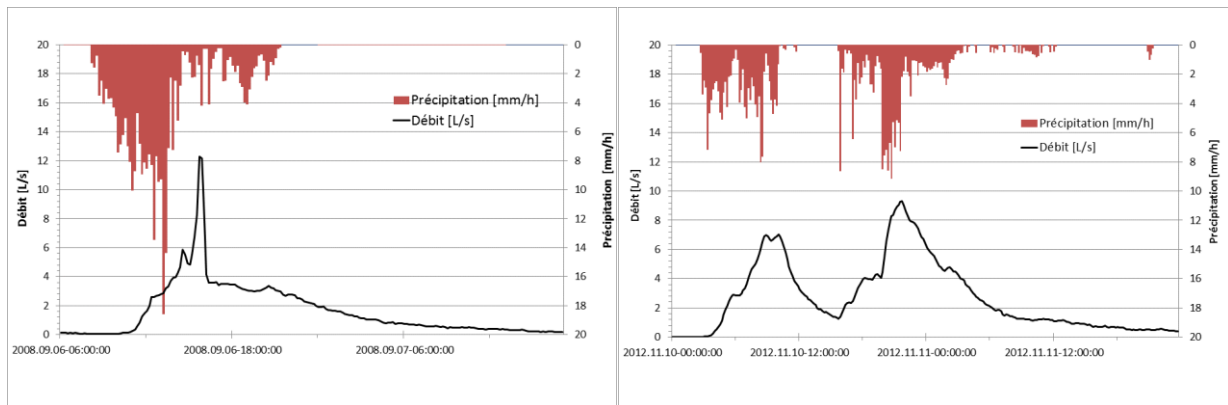


Figure 6 Précipitation et réponse hydrologique de la toiture végétalisée pour les deux événements les plus importants de la période de mesure (pas de temps de 10 min).

L'événement de septembre 2008 a été déjà partiellement discuté au paragraphe précédent. Le débit de pointe est le plus important enregistré pendant la période de mesure. Le débit nominal des 10 Vortex (9 [l/s] au total) est dépassé pendant 20', ce qui soulève des questions quant à leur bon fonctionnement et/ou à leur exact calibrage. L'analyse détaillée de cet événement suggère qu'il ne s'agit pas d'une surestimation des débits et volumes mais au contraire plutôt d'une sous-estimation des débits et volumes écoulés (voir ci-dessous). En effet, dans un moment où la capacité de stockage du système était pratiquement épuisée, les 53 [mm] de précipitation ont produit seulement 29 [mm] d'écoulement mesuré. Il est donc probable que le dispositif de filtration ait dysfonctionné et une partie non-négligeable des eaux de drainage ont échappé à la mesure. Ceci a été corroboré par des observations in situ ultérieures.

En novembre 2011, on assiste à deux événements successifs, séparés par un intervalle sans pluie de moins de 12 [h], temps pendant lequel le système ne s'est pas ressuyé complètement et produit encore un débit significatif. Le premier corps d'averse apporte 30 [mm] de précipitation alors que le deuxième corps d'averse apporte encore 57 [mm]. Jusqu'au début de la deuxième montée de débit, il s'écoule 28,5 [mm], ce qui représente un coefficient d'écoulement qui dépasse les 90%. Lors du deuxième épisode d'averse, la lame écoulée correspond à 52 [mm], ce qui représente également un coefficient d'écoulement qui dépasse les 90%. A noter que le débit de pointe constitue environ 50% de l'intensité maximale de la précipitation, calculée pour des durées comprises entre 20 [min] et 2 [h]. La réponse hydrologique lors de cet événement montre que lorsque la capacité de stockage du système est dépassée, celui-ci réagit comme un système seuil avec un taux de conversion de la précipitation en écoulement proche de 100%.

L'analyse des décrues permet de constater que pour des débits supérieurs à 1 [l/s], l'écoulement peut être décrit par un réservoir linéaire ayant une constante de temps comprise entre 3 [h] et 4 [h] (voir aussi la Figure 7 ci-dessous). Toutefois pour des débits inférieurs, la constante augmente sensiblement à des valeurs de 10 [h] à 12 [h] ce qui est une indication forte de non-linéarité du système. Quarante-huit heures après la fin des précipitations l'écoulement significatif s'arrête. Cet intervalle de temps correspond bien au temps usuellement mesuré en physique du sol jusqu'à la cessation du drainage gravitaire (et utilisée pour définir la capacité au champ).

4 PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET LEUR MODÉLISATION

4.1 Processus hydrologiques

Dans la présente analyse, nous considérons deux processus principaux: l'**atténuation** et la **soustraction**. Par atténuation, nous comprenons la réduction des débits de pointe et des vitesses de variation des débits, ce qui se traduit par un étalement de l'hydrogramme. Ce processus est principalement contrôlé par la transmission dans le substrat et dans une moindre mesure dans la couche drainante et implique ce qu'on appelle l'eau gravitaire ou l'eau libre. Comme suggéré par les analyses au paragraphe précédent, ce processus domine la réponse hydrologique lors des événements majeurs qui se produisent lorsque la capacité de rétention du système est épuisée. Dans le cas présent, les durées caractéristiques de ce processus varient entre quelques heures et quelques dizaines d'heures. Même si en principe, il serait possible d'appréhender ce processus par une modélisation fine du système de drainage (écoulement dans le sol et le substrat, exfiltration dans les tubes de drainage), l'effort nous semble excessif et la détermination a priori des paramètres

caractéristiques à notre avis sujette à d'importantes incertitudes. Par conséquent, cette démarche ne se justifie que rarement lorsqu'on prend en considération l'envergure de la plupart des projets de réalisation. Une détermination sur les systèmes déjà construits est possible avec les techniques d'analyse de l'hydrogramme.

Par soustraction, nous entendons la réduction du volume écoulé par rapport aux précipitations, particulièrement en été. Cette réduction a un effet indirect mais souvent très significatif sur les débits de pointe (voir le premier exemple présenté au §3.2 ci-dessus). Ce processus est contrôlé d'une part par la demande d'évapotranspiration de l'atmosphère et d'autre part par le stockage capillaire de l'eau dans le substrat. Ce stockage est usuellement connu sous le nom de réserve utile (RU) du sol. Cette dernière est fonction d'une part de l'épaisseur du substrat et d'autre part de ses caractéristiques physiques. Il est donc relativement aisé d'estimer avec des mesures in situ et/ou les indications de la littérature (voir p.ex. Musy et Soutter, 1991) la RU d'un substrat donné. Pour les sols naturels, le pourcentage d'eau capillaire est maximal (22% à 25%) dans les sols à texture limoneuse. Cette approche permet également de concevoir et dimensionner un substrat pour atteindre une RU cible. Pour le système qui nous intéresse, la RU a été estimée à 45-55 [mm]. Le temps caractéristique associé au processus de soustraction est nettement plus long que celui du processus d'atténuation et varie entre 2 et 20 jours.

4.2 Modèle simple de bilan

Afin d'évaluer le comportement du système, en particulier la fréquence et les conditions d'activation de l'écoulement ainsi que les volumes drainés, nous avons construit un modèle simple de bilan (Figure 7). Le modèle fonctionne à un pas de temps nominal horaire, mais l'interprétation des résultats doit se faire à un pas de temps journalier ou événementiel. La soustraction est le principal processus modélisé, alors que l'atténuation est schématisée à l'aide d'un seul réservoir linéaire, ce qui est insuffisant pour appréhender sa complexité à un pas de temps plus fin.

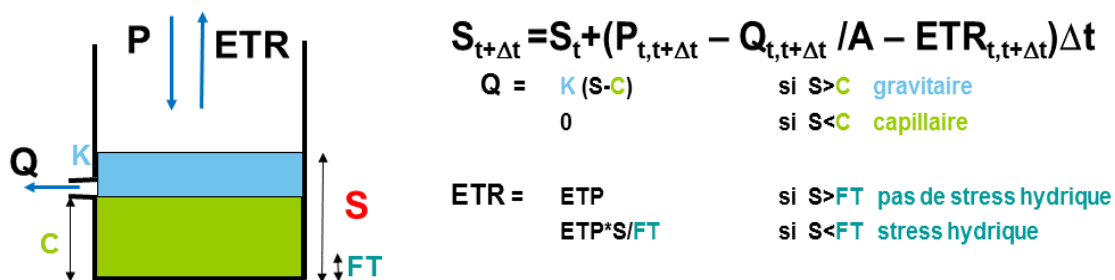


Figure 7. Représentation schématique du modèle de bilan et des équations utilisées.

Dans les équations ci-dessus P [m/h] est la précipitation, ETP et ETR [m/h] sont respectivement l'évapotranspiration potentielle et réelle, Q [m³/h] est le débit à la sortie du système, A [m²] la superficie de la toiture, Δt [h] le pas de temps, S [mm] est le stockage total dans le système, la seule variable d'état du modèle alors que C [m], FT [m] et K [h⁻¹] sont les trois paramètres du modèle. C représente le stockage qui n'est pas disponible pour le drainage gravitaire et qui peut être extraite seulement par évapotranspiration. Il s'agit de la réserve utile du substrat ainsi qu'une partie du stockage dans la couche drainante (correspondant à la porosité dans les 5 [cm] sous le seuil de déversement des vortex). Le stockage C est divisé en deux parties, une facilement accessible aux plantes ($C-FT$) et une autre (FT) où l'évapotranspiration est limitée (stress hydrique). Les valeurs de ces paramètres ont été estimées sur la base des plans de construction et de la reconnaissance de terrain à 0,065 [m] pour C et à 0,015 [mm] pour FT . Le paramètre K a été fixé à 0.8 [h⁻¹] sur la base d'une analyse d'hydrogrammes mesurés.

Les résultats obtenus avec ce modèle sont illustrés par la Figure 8 ci-dessous qui reprend la période de juillet-août 2009 déjà discutée au §3.2. Sont représentés sur cette Figure le stockage modélisé dans le système (le "0" correspond à un stockage de 65 [mm], c'est-à-dire à l'activation de l'écoulement), ainsi que les principaux flux d'entrée et de sortie (précipitation, écoulement, évapotranspiration) sous forme cumulative. On peut constater que si le modèle reproduit correctement les trois périodes où l'écoulement est activé (17.07, 10.08 et 27.08), on note une erreur de 100% sur l'écoulement modélisé par rapport à celui observé. A notre avis, ce type de résultat est dû autant à une erreur de structure de modèle et/ou de paramétrisation qu'à des erreurs dans la mesure des précipitations, des débits et de l'évapotranspiration. On peut noter que l'écoulement ne représente que 5% de ces dernières qui sont de loin les termes principaux du bilan. Par ailleurs, la modélisation des lames écoulées est nettement meilleure lors des périodes humides, qui ne sont pas illustrés ici,

lorsque l'évapotranspiration est faible et le taux de conversion de la précipitation en écoulement est proche de l'unité, comme c'est le cas en novembre 2012 (voir ci-dessus Figure 9).

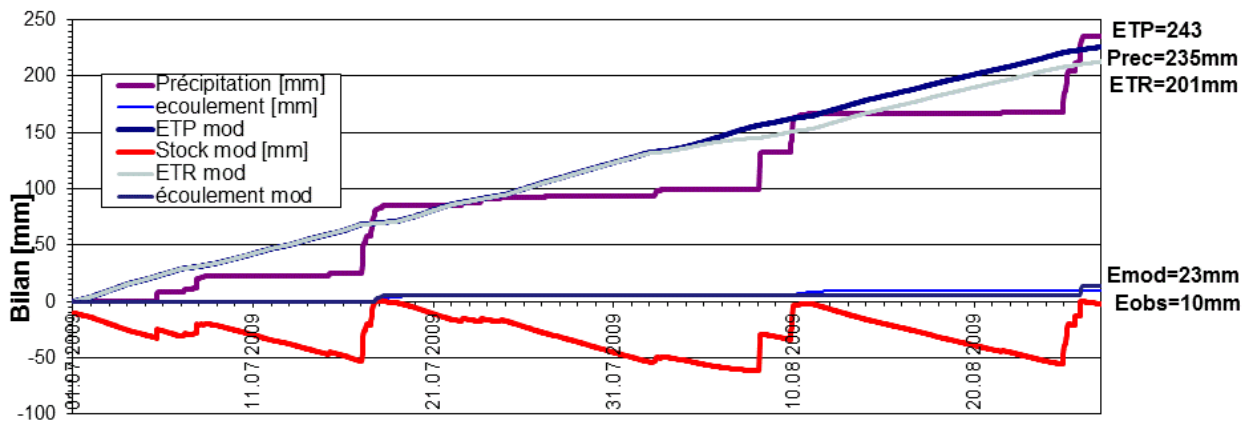


Figure 8. Résultats du modèle de bilan pour la période juillet-août 2009

Nous sommes d'avis qu'un tel modèle simple et robuste peut s'avérer un outil adéquat dans l'évaluation des performances d'un système donné, voire dans le dimensionnement de projet. En effet, des simulations de longue durée sur la base de séries observées ou générées de précipitation et d'évapotranspiration permettent d'extraire des statistiques relativement fiables concernant les fréquences et les volumes d'écoulement. A notre avis, cette approche est plus fiable et robuste que des alternatives comme les modèles de régression ou les modèles de type pluie de projet – crue de projet. En effet, pour des substrats ayant une réserve utile importante, l'historique du forçage climatique devient déterminant dans la réponse à des événements, même pour ceux caractérisés par un temps de retour élevé.

4.3 Modèle de réponse événementielle

Comme montré lors de l'analyse événementielle (§3.3), la réponse hydrologique à une échelle temporelle fine n'est pas bien reproduite à l'aide du modèle à un réservoir linéaire, en particulier lors d'événements importants. Afin de mieux reproduire la réponse à cette échelle, nous avons remplacé le réservoir linéaire par un réservoir non linéaire ($Q = a(S-C)^n$). Les paramètres a et n de ce modèle ont été calibrés par tâtonnements ("trail-and-error") sur l'événement de novembre 2012 avec des résultats satisfaisants (Figure 9, panneau de droite). La valeur retenue pour le paramètre n (1,8) indique une forte non-linéarité de la réponse hydrologique pour cet événement.

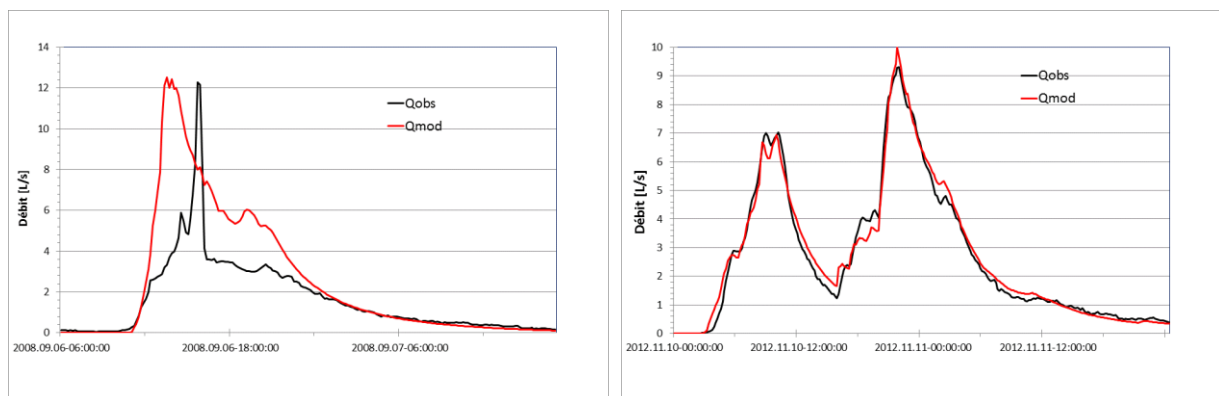


Figure 9 Débits observés et débits modélisés pour les événements de septembre 2008 et novembre 2012.

Les résultats pour l'événement de septembre 2008 sont nettement moins bons (Figure 9, panneau de gauche). Les erreurs dans le modèle peuvent avoir un rôle car le modèle de réservoir non-linéaire n'est pas très robuste. Toutefois ici, le problème principal est lié aux volumes écoulés ou autrement dit au bilan. En effet, le modèle prédit un volume écoulé sensiblement plus élevé que celui mesuré. Des erreurs dans l'estimation de l'évapotranspiration ne sont pas la cause de cette erreur de prédiction car les 70 [mm] précipités les jours précédents avaient déjà comblé le déficit causé par l'évapotranspiration et provoqué un écoulement significatif. Les résultats obtenus s'expliquent donc soit par des erreurs dans la mesure de la pluie soit, plus vraisemblablement, par des erreurs dans la mesure du débit. Nous nous trouvons dans une situation dans laquelle la modélisation permet de mettre en évidence des questions concernant la qualité des données.

5 QUALITE DE L'EAU DE DRAINAGE

Parallèlement à l'étude hydrologique menée depuis 2007, un volet qualitatif a vu le jour en 2012 afin de déterminer l'aptitude de ces eaux d'écoulement à retourner au milieu naturel : le cours d'eau de la Seymaz. Les eaux de ruissellement de la toiture végétalisée du Cycle d'Orientation transitent par un bassin de rétention de servant de réservoir d'eau grise pour l'école. Une fois que le bassin est rempli, un trop-plein achemine l'eau vers la Seymaz.

À priori, la problématique principale de ces eaux de ruissellement réside dans le produit herbicide traditionnellement incorporé aux étanchéités bitumineuses jouant également le rôle de barrière anti-racinaire. Le produit le plus utilisé est le Mécoprop (OFEV, 2009). Une analyse de l'eau du bassin de rétention par chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem, précédée d'une étape d'enrichissement sur phase solide Oasis HLB, n'a révélé aucune trace d'herbicide (47 substances recherchées dont le Mécoprop). Suite à ce résultat, des investigations ont été menées afin d'obtenir des précisions sur les matériaux de construction. Nous avons pu mettre en évidence l'utilisation d'une étanchéité PVC exempte d'herbicides en lieu et place de la traditionnelle étanchéité bitumineuse. Elle constitue donc une simple barrière physique contre les éventuelles racines qui parviendraient jusqu'à cette profondeur.

Tableau 3 : Qualité des eaux d'écoulement de la toiture végétalisée.

Date	09.08.2012	01.10.2012		06.11.2012
Lieu de prélèvement	Bassin	Bassin	Écoulement du toit	Écoulement du toit
pH	8,29	8,00	8,19	8,12
Conductivité (µS/cm)	496	507	513	527
COD (mg/L)	21,3	28,8	28,6	21,8
Cr (µg/l)	0,6	1,1	0,6	n.a
Ni (µg/l)	9,4	9,5	8,4	n.a
Cu (µg/l)	28,3	50,2	37,7	n.a
Zn (µg/l)	18,8	51,4	44,9	n.a
Cd (µg/l)	0,02	0,13	0,04	n.a
Pb (µg/l)	<0,1	0,44	<0,1	n.a

La problématique de la contamination de l'eau par des herbicides étant écartée, nous nous sommes alors intéressés aux paramètres majeurs et métaux lourds afin de caractériser au mieux cette eau. Les résultats sont présentés dans le tableau 3 ci-dessus. Le premier prélèvement du 9 août 2012 avait fait l'objet d'analyses complètes non présentées dans ce tableau. Les concentrations en nitrate, nitrite et phosphore étaient très faibles et n'ont donc pas été reconduites. Les quatre échantillons montrent globalement une bonne reproductibilité mais sont relativement contaminés par le nickel, le cuivre et le zinc. La concentration en carbone organique est également élevée. Dans la mesure où la totalité de la plomberie est en PVC, les contaminations proviennent probablement majoritairement de la lixiviation du sol par l'eau de pluie. Les vortex en acier zingué peuvent également contribuer à la contamination métallique. Des tests de lixiviation du sol suivis d'analyses permettront de déterminer la contribution exacte du sol.

En attendant ces résultats et partant de l'hypothèse que la majorité des contaminations observées sont imputable à la lixiviation du sol, nous estimons que l'eau est de qualité suffisante pour rejoindre le cours d'eau. Les conditions sont en effet très proches des conditions naturelles où un pâturage remplacerait le bâtiment du Cycle d'Orientation.

6 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

L'épaisseur et les caractéristiques de rétention du substrat de la toiture végétalisée du Cycle d'Orientation de la Seymaz lui confèrent une capacité significative de stocker les précipitations et de les re-évaporer vers l'atmosphère. En conditions normales et sèches comme celles qui ont prévalu pendant les étés 2008 à 2012, la toiture a eu un comportement hydrologique quasi-rural. Des averses très importantes en intensité et/ou volume (temps de retour de 2 à 5 ans) ont été absorbées pratiquement intégralement et ont entraîné une réponse négligeable en termes de débit drainé. Dans ces conditions, on constate un lien faible entre l'intensité des précipitations et le débit à pas de temps

réduit (<1h). La réaction hydrologique devient importante en conditions humides ou lors d'événements de grand volume. Dans ces conditions, on assiste à un véritable effet seuil, avec un taux de conversion précipitation-écoulement proche de l'unité. Toutefois, l'atténuation dans le système reste nettement plus importante que pour une toiture conventionnelle. Un dispositif de régulation simple, tel le vortex, est utile voire nécessaire même dans le contexte des toitures végétalisées afin de limiter les débits sortants. Un modèle de bilan simple s'avère suffisant pour évaluer la performance de rétention d'un substrat de capacité donnée. Il est proposé d'utiliser ce modèle en simulation continue avec des séries mesurées ou générées de précipitations et d'évapotranspiration afin d'évaluer l'efficacité des projets. L'étude de qualité de l'eau n'a montré aucune contamination par des herbicides; ainsi la qualité de l'eau qui s'écoule de la toiture est jugée suffisante pour retourner au milieu naturel.

BIBLIOGRAPHIE

- De Cuyper K., Dinne, K., Van De Vel L., (2006). Toitures vertes : évacuation des eaux pluviales. Les Dossiers du CSTC, Cahier n° 2.
- Etat de Genève (2004) Gestion des eaux non polluées. Méthode simplifiées pour le dimensionnement et la conception des ouvrages de rétention. Genève.
- Etat de Genève (2011). *Pluies genevoises; Intensité des pluies de la région genevoise*. Directive IDF 2009. Genève.
- Massy, J., Martin, P., Wyler, N., (2011). Cartographie semi-automatisée des toitures végétalisées de la Ville de Genève. *Géomatique Expert*, 81: 26-31.
- Mertens, J. Raes, D., and Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77:217–226.
- Musy, A. and Soutter, M., (1991). *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 335 pp
- Office fédéral de l'environnement (2009), Informations concernant le mécoprop contenu dans les couches bitumineuses des toitures végétalisées. Berne.