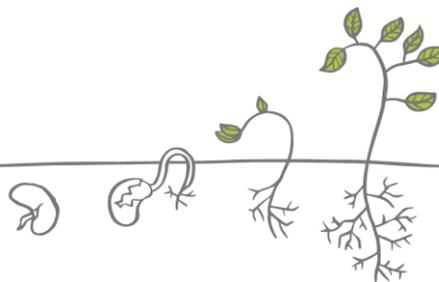


26/01/2016

ANALYSE DE L'EFFICACITE HYDROLOGIQUE D'UNE TOITURE VEGETALISEE DANS LE CANTON DE GENEVE

[Fiche de synthèse]



TITRE :

Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée dans le canton de Genève

AUTEUR :

David CONSUEGRA, professeur HES, Fatimétou N'GAIDÉ DIOUF, collaboratrice scientifique, Dr Pierre QUELOZ, collaborateur scientifique

THEMATIQUES :

Agronomie - Sols urbains - Conduite des végétaux, Choix des végétaux et innovation végétale

MOTS-CLES :

Biodiversité, flore, toiture végétalisée, Genève

RÉSUMÉ :

Le phénomène de l'urbanisation engendre une augmentation des surfaces imperméables telles que routes ou bâtiments, au détriment d'espaces cultivés, de forêts ou de prairies. Une évacuation des eaux de ruissellement doit donc être prévue, ce qui engendre des coûts importants et peut poser des problèmes lorsque le réseau est déjà chargé. Parmi les mesures développées afin de limiter le volume d'eau ruisselée et de laminar les pics de débit à évacuer, les toitures végétalisées sont étudiées dans ce rapport. Une toiture végétalisée consiste principalement en une couche de substrat d'épaisseur variable permettant le stockage temporaire de l'eau pluviale, qui sera soit évacuée par un drainage de fond, par des drains de surface, ou restituée dans l'atmosphère par évaporation ou transpiration des végétaux qui se développent sur le substrat.

Le fonctionnement hydrologique de la toiture végétalisée semi-intensive du cycle d'orientation de la Seymaz à Genève a été étudiée à l'aide de mesures pluviométriques et débitométriques du drain pendant une période de 6 ans. L'analyse de ces données a montré une forte différence saisonnière de la réponse, avec une évacuation de l'eau pluviale par le drain de l'ordre de 80 % en hiver, alors qu'en été, toute l'eau pluviale est stockée dans le substrat et restituée dans l'atmosphère par évapotranspiration. Une modélisation de ce système a permis de tester la réponse de la toiture avec des pluies stochastiques représentatives de la région pendant une période de 20 ans, et de comparer cette réponse avec celle d'une toiture conventionnelle modélisée. La réponse de la toiture de la Seymaz confirme le bilan calculé avec la période de mesures, avec annuellement 60 % du volume de précipitation évaporé et transpiré et 40 % restitué au drain, contre 80 % d'évacuation au drain pour une toiture conventionnelle.

L'analyse de données d'autres toitures végétalisées en région genevoise, toutes extensives (épaisseur de substrat plus faible et surtout absence de drainage de fond) a permis de comparer leur efficacité hydrologique par rapport aux prédictions de la réponse du toit vert semi-intensif de la Seymaz pour la même période (la période de mesure des toits verts extensifs étant très courte, les résultats sont à prendre avec réserve). La part de précipitation évacuée au drain varie entre 15% au minimum pour le collège de la Seymaz et un maximum de 45 %. Une modélisation de ces toitures et une simulation de leur réponse à des séries de pluies stochastiques de 20 ans ont également été effectuées. Les résultats indiquent des restitutions au drain entre 40 % (Seymaz) et 65 %, avec des performances en termes de limitation de débit nettement plus faibles pour une des toitures végétalisées intensives (la période de retour d'un débit de pointe de 20 Ls-1ha-1 passe de l'ordre d'une année à un mois). Les différentes réponses s'expliquent essentiellement par la capacité de stockage (épaisseur et paramètres de rétention du substrat) dans le cas des toitures extensives dont le fonctionnement est similaire à celui des toitures piscines, alors que le comportement de la couche de drainage de fond devient également un paramètre important dans le cas de la toiture semi-intensive en permettant – mais en limitant – l'évacuation de l'eau pluviale par le drain avant que le substrat soit saturé.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	5
2	PROBLÉMATIQUE	5
3	SYNTHÈSE DE LA LITTÉRATURE EXISTANTE	7
	3.1 CONCEPTUALISATION DU SYSTÈME	7
	3.2 EVAPORATION ET TRANSPIRATION	7
4	ETUDE DU CAS D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE INTENSIVE : LE CO DE LA SEYMAZ	8
	4.1 MÉTHODOLOGIE	9
	4.2 ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA TOITURE VÉGÉTALE	10
	4.2.1 Comportement général	10
	4.2.2 Corrélation pluies – débits	11
	4.2.3 Comportement hivernal	11
	4.2.4 Comportement estival.....	12
	4.3 MODÈLE HYDROLOGIQUE	12
	4.3.1 Mise en œuvre du modèle	12
	4.3.2 Résultats de simulations - pluies de Mirany.....	14
	4.4 SIMULATIONS AVEC LES PLUIES STOCHASTIQUES	16
	4.4.1 Réponses hydrologiques de la TV.....	16
	4.4.2 Comparaison avec une toiture de référence	18
5	COMPARAISON DE L'EFFICACITÉ HYDROLOGIQUE DE 4 TOITURES VÉGÉTALISÉES EN RÉGION GENEVOISE	20
	5.1 DESCRIPTION DES TOITURES ET DONNÉES À DISPOSITION	20
	5.2 COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES TOITURES	21

5.3	MODÉLISATION DES TOITURES EXTENSIVES.....	22
5.4	SIMULATION À LONG TERME AVEC DES PLUIES SYNTHÉTIQUES.....	24
6	SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS.....	26
	BIBLIOGRAPHIE.....	27
6.1	BIBLIOGRAPHIE.....	27

1 INTRODUCTION

Dans les pays industrialisés, le taux d'urbanisation est toujours à la hausse. Les terres cultivées, les prairies et les forêts sont déplacées au profit des surfaces imperméables composées notamment des rues, des trottoirs et des bâtiments. Un des problèmes environnementaux majeurs de l'urbanisation est que le système hydrologique urbain doit faire face à une quantité très fluctuante des eaux de ruissellement de surface qui peuvent devenir extrêmement élevées pendant les périodes de précipitations et rester faibles pendant le reste du temps (Blanc, 2002).

Nombreuses sont les mesures qui commencent à voir le jour pour réduire le ruissellement élevé lors des pluies, pour augmenter la rétention et le stockage dans les réservoirs, les étangs et les espaces verts où l'eau peut s'infiltrer et s'évaporer.

Grâce à leur capacité de stockage, les toits verts sont l'une des mesures qui peuvent réduire de façon significative le pic de ruissellement des événements pluvieux et délester la charge rejetée dans le système d'évacuation des eaux. Cette réduction consiste à retarder le début de l'écoulement par l'absorption d'eau dans la couche végétale du système de toit vert ; à distribuer le volume total d'eau de ruissellement sur une longue période de temps (écrêter la pointe de l'hydrogramme) grâce au stockage temporaire de l'eau dans les pores du substrat ou encore à réduire le ruissellement total en retenant une partie de la pluviométrie qui sera absorbée par les végétaux.

Les toits verts se composent essentiellement d'une couche de végétation, d'une couche de substrat (où l'eau est retenue et dans laquelle la végétation est ancrée) et d'une couche de drainage (évacuant l'excès d'eau).

Principalement sur la base de la profondeur de la couche de substrat, deux types de toits verts sont distingués en Europe (Krupka, 1992; Kolb et Schwarz, 1999):

- **Les toits verts extensifs** avec une couche de substrat d'une profondeur maximale d'environ 150 mm. Les sedums constituent habituellement la majeure partie de la végétation. Ce type de toit peut également être installé sur des surfaces en pente allant jusqu'à 45° d'inclinaison.
- **Les toits verts intensifs** avec une couche de substrat d'une profondeur de plus de 150 mm. Les graminées, herbes vivaces et arbustes constituent principalement la végétation retrouvée sur ce type de toit qui est généralement installé sur des surfaces en pente de moins de 10° et, en fonction de la conception et de l'accès, peuvent être utilisés en tant que toit jardins.

2 PROBLÉMATIQUE

Dans plusieurs pays d'Europe entre autres, la gestion durable des eaux de pluie est fortement encouragée. Par exemple, au Royaume-Uni, l'Agence Environnementale promeut la mise en œuvre des systèmes de drainage durable : les « SuDS » (Sustainable Drainage System) pour la gestion des eaux de ruissellement (Woods-Ballard et al., 2007). L'idée générale des « SuDS » est bien évidemment de favoriser la gestion durable des eaux de pluie ; ceci, idéalement le plus proche possible de la source. Par ailleurs, il est préconisé d'adopter le concept de la « chaîne de traitement » où plusieurs infrastructures durables seraient combinées pour fournir une gestion optimale des eaux de ruissellement qu'une infrastructure seule ne pourrait garantir.

L'attention est portée ici sur les toitures végétalisées. Plusieurs études ont été réalisées dans le but de quantifier leur efficacité hydrologique. Ces études ont toutes révélé que les toits verts contribuent d'une façon plus ou moins significative à la réduction du ruissellement pluvial.

Les principaux processus hydrologiques retrouvés dans le fonctionnement des toits verts sont l'infiltration de l'eau de pluie dans la couche végétale, l'évapotranspiration vers l'atmosphère, la percolation dans la couche de drainage, puis le ruissellement à la base de la couche drainante de l'eau excédentaire. Notez que le ruissellement de surface est très rarement (voire jamais) observé dans le cas des toitures végétalisées car l'eau de pluie est généralement absorbée par les racines puis évaporée avant que ce ruissellement ne se produise. Plusieurs modèles existent pour traduire ces divers processus. L'un des processus les plus complexes est celui de l'évapotranspiration qui combine l'évaporation à la surface du sol et la transpiration des végétaux. Le terme évapotranspiration potentielle fait référence à l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau (Mermoud, 2009). Plusieurs chercheurs ont tenté de trouver les paramètres les plus influents ; Kelly et al. (2007) ont pu montrer que l'épaisseur du substrat n'avait que très peu voire pas du tout d'effet sur les taux d'évapotranspiration. Les conditions météorologiques locales auraient en revanche une influence primordiale. Plusieurs approches de modélisation existent pour estimer l'évapotranspiration (essentiellement empiriques), la plupart étant basées sur des paramètres hydroclimatiques mais variant considérablement dans leur complexité (Douglas, Jacobs, Sumner, & Ray, 2009).

Différents modèles existent pour l'infiltration, tels que le modèle d'Horton où la capacité d'infiltration $i(t)$ dépend des capacités initiales, finales et d'une constante empirique (fonction de la nature du sol) difficile à mesurer. Par ailleurs, le modèle selon Green Ampt est basé sur la loi de Darcy et inclut les paramètres hydrodynamiques du sol tels que les charges hydrauliques totales, au niveau du front d'humidification et en surface.

La question est de savoir quelles sont les stratégies de modélisation adoptées dans les différentes études réalisées à ce sujet, les diverses hypothèses prises en compte et les principales conclusions tirées quant aux paramètres les plus influents menant à un calage adéquat du modèle simulé par rapport aux valeurs observées.

3 SYNTHÈSE DE LA LITTÉRATURE EXISTANTE

De nombreuses études présentent le comportement hydrologique et hydraulique de toitures végétalisées existantes ou de modèles expérimentaux. Toutes s'accordent généralement sur une efficacité importante en terme de rétention des eaux pluviales et donc de laminage de la réponse en terme de drainage pour ce type d'ouvrage.

3.1 CONCEPTUALISATION DU SYSTÈME

Bien que moins nombreux que ceux focalisés uniquement sur la performance de rétention des toitures végétalisées, plusieurs travaux font rapport de la calibration d'un modèle permettant de décrire le comportement hydrologique et hydraulique des toits verts expérimentaux ou réels. La plupart des récentes études analysées pour ce travail ont comme point commun la distinction de deux compartiments, le premier correspondant à la couche de substrat et le second la couche de drainage. Cette dernière est souvent représentée par une approche d'écoulement à surface libre, par exemple par onde cinématique (Carbone, Garofalo, Nigro, & Piro, 2014) ou par l'équation empirique du type de Manning-Strickler comme c'est le cas dans le module LID du modèle SWMM5 (Burszta-Adamiak & Mrowiec, 2013, She et al. 2010). Certaines études décrivent également la couche de drainage comme un réservoir permettant une rétention temporaire, par exemple selon un modèle de vidange non-linéaire (Locatelli et al. 2014, Vesuviano et al. 2014).

Les modèles conceptuels utilisés pour représenter la rétention variable et la dynamique de vidange de la couche de substrat sont diverses. Plusieurs études considèrent que les précipitations (effectives) qui parviennent dans la couche de substrat sont retenues jusqu'à concurrence de la capacité au champ, au-delà de laquelle les précipitations excédentaires percolent dans la couche de drainage (ou directement dans le drain si aucune couche de drainage n'est considéré). Généralement, un délai supplémentaire est souvent représenté par une vidange de réservoir non-linéaire (Kasmin et al. 2010, Locatelli et al. 2014, Stovin et al. 2013). Le modèle d'infiltration de Green-Ampt est également largement utilisé (notamment dans le module LID de SWMM5), permettant de reproduire une diminution de la capacité d'infiltration au cours du temps (Burszta-Adamiak and Mrowiec 2013, Carbone et al. 2014, She et al. 2010) et permettant ainsi une accumulation de surface lorsque la capacité d'infiltration est atteinte. Vesuviano et al. (2014) considèrent quant à eux la couche de substrat comme un réservoir non-linéaire. Dans tous ces exemples, le flux d'évapotranspiration (lorsqu'il est considéré) est prélevé directement de ce compartiment entre les précipitations, et permet donc de rétablir un potentiel de stockage pour la prochaine pluie. Dans certains cas, un compartiment supplémentaire (souvent dit « de surface ») est considéré, par exemple pour prévoir une accumulation en surface lorsque le substrat est saturé (par ex. LID SWMM5), ou pour tenir compte de l'interception par les végétaux et l'évaporation de l'eau interceptée (Lamera et al. 2014).

Même si certains modèles décrits ci-dessus contiennent des paramètres physiques (capacité au champ, porosité, etc.), ceux-ci restent difficiles à déterminer a priori sans expérimentation directe sur des échantillons en conditions. De plus, beaucoup des modèles présentés gardent essentiellement ou partiellement des paramètres qui ne peuvent qu'être estimés approximativement grâce à d'autres études en conditions similaires, voir même des paramètres purement conceptuels uniquement identifiables par calibration (comme par exemple pour les paramètres de vidange d'un réservoir). Parmi les études citées dans ce rapport, seul Stovin et al. (2013) présente un modèle non calibré qui prend en compte une évapotranspiration corrigée en fonction de l'humidité du sol. Ce modèle a fourni de bons résultats en terme de volume de drainage annuel total et des prédictions d'écoulement événementiels sur une période de validation d'une année.

3.2 EVAPORATION ET TRANSPIRATION

La présence de végétation qui pousse sur le substrat permet, en plus de l'évaporation de surface, d'augmenter la quantité d'eau retenue qui est renvoyé vers l'atmosphère et ne participe pas au drainage, restaurant ainsi la

capacité de rétention du substrat entre les événements pluvieux. En conséquence de la difficulté de mesurer directement l'évapotranspiration et des performances souvent insuffisantes des modèles d'évapotranspiration existants, bon nombre d'études contournent ce problème soit en installant des systèmes expérimentaux non plantés ou en ne s'intéressant que à la réponse hydrologique de ces ouvrages suite à un événement pluvieux, mais négligeant les périodes inter-événements (Bruszt-Adamiak & Mrowiec 2013, Carbone et al. 2014, Lamera et al. 2013, Vesuviano and Stovin 2013, Vesuviano et al. 2013). Parmi les travaux qui prennent en compte manière directe l'évapotranspiration (nécessaire par exemple pour de la simulation continue), on peut notamment citer ceux qui se basent sur le bilan de masse entre la fin et le début de l'évènement suivant (Kasmin et al. 2010) ou l'utilisation de relations empiriques comme celle Thornwaite, de Priestley-Taylor ou Penman-Monteith (Kasmin et al. 2010, Marasco et al. 2015, Locatelli et al. 2014, Stovin et al. 2013). Les méthodes empiriques permettant le calcul d'une évaporation potentielle de référence sont souvent couplées à des modèles ou des indicateurs afin de tenir de l'humidité du sol et d'un possible stress hydrique limitant ainsi l'évaporation réelle. Il a été démontré que souvent, les méthodes simples basées essentiellement sur la température ou la radiation telles que celles de Thornwaite ou de Priestley-Taylor sont plus performantes pour des systèmes pluie-débit relativement simples, et peuvent être sensiblement améliorés lorsqu'elles sont couplées avec un modèle permettant de prendre en considération l'humidité du sol comme facteur limitant (Marasco et al. 2015, Oudin al. 2005).

4 ETUDE DU CAS D'UNE TOITURE VÉGÉTALISÉE INTENSIVE : LE CO DE LA SEYMAZ

La problématique est d'analyser l'efficacité hydrologique de la toiture végétalisée du collège de la Seymaz à Chêne-Bourg, en quantifiant ses impacts sur le régime hydrique du milieu récepteur et en comparaison avec une toiture traditionnelle.

Note : l'efficacité hydrologique fait ici référence à la fraction d'eau pluviale retenue puis évaporée par le toit vert (cette fraction n'arrivant pas à l'exutoire).

La toiture végétalisée à l'étude est celle du Cycle d'Orientation de la Seymaz située dans la commune de Chêne-Bourg et ayant fait l'objet d'une étude préalable réalisée par l'Etat de Genève.

La toiture végétalisée étudiée a une superficie de 8770 mètres carrés et le bâtiment a été construit en 2007. C'est une toiture dite semi-intensive avec un substrat ensemencé en graines extensives et une végétation de type prairie. La toiture est composée des couches suivantes :

- Un substrat de 21.5 cm d'épaisseur de terre végétale ayant une texture limoneuse et provenant des horizons supérieurs du sol présent sur le site avant la construction ;
- Une couche filtrante en géotextile ;
- Une couche de matériau drainant en argile expansé de 5 cm d'épaisseur ;
- Une étanchéité en PVC ayant également le rôle d'anti-racine.



Figure 2 : Localisation du toit vert et de la station pluie-débit Mirany (à gauche). Drain de la toiture avec vortex (à droite)

Dix régulateurs de débit (vortex) ont été installés dans le but de respecter la recommandation genevoise pour la gestion de l'eau. Cette recommandation (Etat de Genève, 2004) impose une gestion des eaux pluviales à la parcelle avec une limite de rejet de 10 L/s/ha pour un temps de retour de 20 ans. Le système de drainage est complété par un réseau de tubes perforés qui acheminent les eaux vers dix conduites verticales, réparties sur la toiture de façon à drainer chacune un dixième de la superficie totale du toit.

4.1 MÉTHODOLOGIE

Trois principaux objectifs ont été déclinés dans le cadre de cette recherche.

Le **premier objectif** est d'analyser les données de pluies et débits de la station Mirany (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) afin de comprendre le comportement général de la toiture végétalisée.

Le **deuxième objectif** est de trouver un modèle hydrologique qui représente le mieux la réponse dudit toit face à une simulation en continu avec les pluies de Mirany. L'atteinte de cet objectif se traduira par un calage adéquat entre les valeurs de débits simulés et celles observées in situ.

Le **troisième objectif** est de simuler la réponse hydrologique de la toiture végétalisée face à un scénario de pluies stochastiques représentant 20 ans de mesures. Une toiture conventionnelle sera modélisée en guise de comparaison ce qui permettra de conclure sur l'efficacité hydrologique du toit vert étudié.

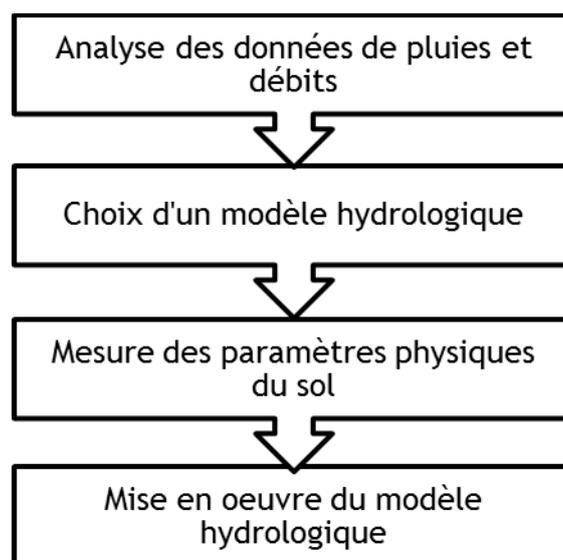


Figure 3 : Méthodologie : principales étapes de l'étude.

Les principales étapes ayant conduit à l'atteinte de ces objectifs figurent sur l'organigramme.

Il est important de définir les **limites de l'étude**. Ainsi, les précipitations dont il est question n'incluent pas les précipitations solides (neige et grêle). Seront étudiés, les volumes de rétention et de ruissellement et la réduction du débit de pointe. Il est pris pour **hypothèse** que les paramètres physiques du sol, requis pour modéliser la toiture végétalisée, sont basés sur les valeurs mesurées au laboratoire corroborées par les valeurs de la littérature.

4.2 ANALYSE DU COMPORTEMENT DE LA TOITURE VÉGÉTALE

4.2.1 COMPORTEMENT GÉNÉRAL

Une première analyse des pluies et débits observés à la station Mirany a permis de dégager un modèle de comportement de la toiture végétalisée. La réaction du toit vert a été étudiée sur 6 années (de janvier 2008 à mai 2014). Le graphique suivant montre un zoom de ces pluies et débits observés, dans la période de mai 2012 à mai 2014.

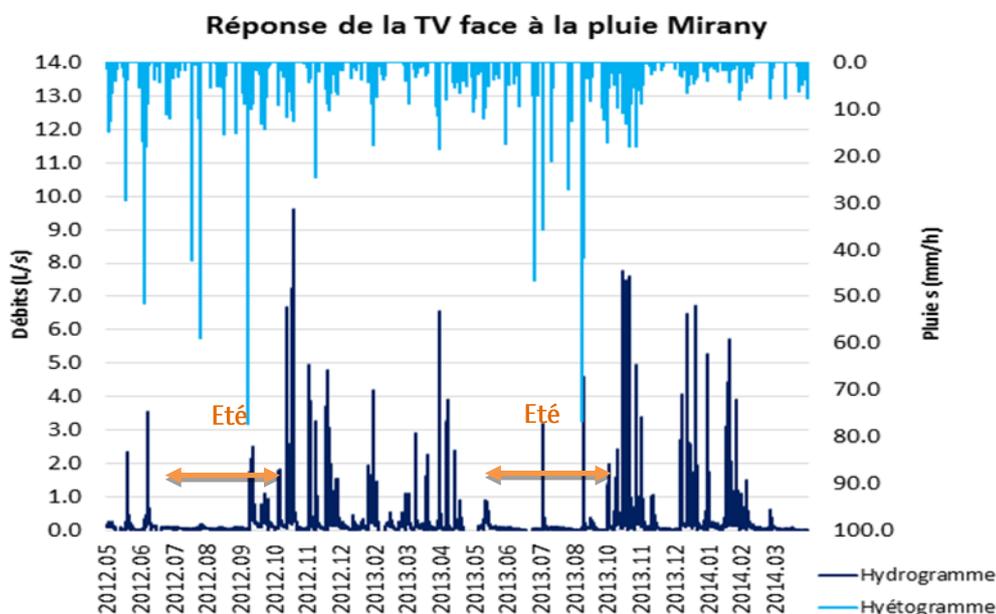


Figure 4 : Réponse hydrologique de la TV face à la pluie Mirany : Pluie et débits observés.

Nous identifions clairement de très faibles débits au drain durant la période estivale (à une exception près). Cela peut s'expliquer par le fait que durant l'été, l'eau de pluie est stockée dans le sol, puis est restituée par évapotranspiration avant même d'atteindre la couche de drainage. En effet, lorsque la teneur en eau du sol est inférieure à sa teneur en eau à la capacité au champ : il n'y a pas de drainage.

Durant la période hivernale, on observe des débits à la sortie du drain. Ceci est dû à la faible évapotranspiration en hiver et à des teneurs en eau élevées (supérieures à la teneur en eau à la capacité au champ) : le sol est proche de la saturation. L'eau des pluies antécédentes s'infiltré à travers la couche de sol, s'y accumule sans être évaporée et finit par être restituée au drain.

Rappelons que la toiture végétalisée est munie de 10 régulateurs de débits ayant chacun une capacité maximale théorique de 0.9 L/s/ha. La superficie du toit étant égale à 0,877 ha, les 10 vortex régulent le débit à une capacité maximale de 7.89 L/s, soit environ 8 L/s.

Nous constatons que les débits observés sont généralement inférieurs à 8 L/s. Cependant, un évènement de novembre 2012 a généré un pic de débit au drain de 9.6 L/s. Ce qui nous interroge sur le bon fonctionnement

des vortex durant cette période de mesures. D'ailleurs pour l'épisode de novembre 2012, l'hydrogramme ne montre pas le plafonnement classique que provoque ce type de régulation (voir ci-dessous).

Pour le moment, nous concluons que les vortex autorisent des rejets supérieurs à la limite imposée par la DGEau. Ce débit maximum observé de 9.6 L/s étant assez proche de la limite des 8 L/s, il se pourrait qu'il s'agisse de la marge d'erreurs liée à la calibration et/ou à la mise en place des vortex.

4.2.2 CORRÉLATION PLUIES— DÉBITS

Afin de déterminer s'il existe une corrélation entre les débits et les pluies, nous avons comparé le cumul des pluies et des débits pour chaque mois de l'année 2013.

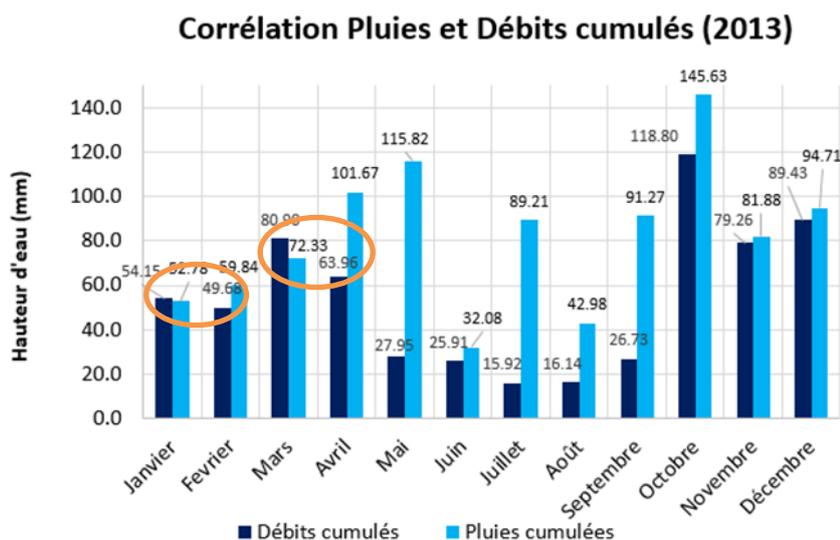


Figure 5 : Corrélation Pluies-débits pour les mois de 2013

De façon générale, il faut constater que la plupart de la pluie tombée à l'échelle mensuelle en hiver est restituée au drain dans des proportions relativement importantes. Pendant cette même période hivernale, les différences entre les pluies et les débits sont mineures. Lorsque le débit dépasse la pluie (comme en janvier et en mars), nous pouvons imaginer qu'il s'agit de faibles imprécisions dans les mesures.

En période estivale, on constate que les débits restitués au drain sont faibles par rapport aux pluies totales. L'exception du mois de juin s'explique par une concentration en une journée d'une pluie qui dépasse les 20 mm (tel que constaté dans les fichiers de prévision météo) qui a probablement saturé le sol générant ainsi un débit au drain.

4.2.3 COMPORTEMENT HIVERNAL

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension de la réponse du toit vert durant la période hivernale, nous avons sélectionné et analysé quelques événements pluies-débits.

Il a été constaté un **décalage de réaction** de la toiture. L'hydrogramme de l'épisode sélectionné démarrait environ 130 minutes après le début de la pluie. Le toit vert joue son rôle tampon permettant de retarder l'arrivée de la crue. De plus, une **restitution prolongée** dans le temps est notée puisque l'hydrogramme met un certain moment à revenir à sa valeur initiale (environ 21 heures depuis la fin de la pluie).

Il a été noté qu'un cumul de 10 mm de pluie était nécessaire avant que le débitmètre n'enregistre une arrivée d'eau dans le drain. On comprend que ces 10 mm représentent la quantité de pluie nécessaire pour déclencher le drainage. Finalement, à la fin de l'épisode étudié (environ au bout d'un jour et demi) les 80 % de la pluie sont restitués au drain. Le solde est retenu dans le sol.

4.2.4 COMPORTEMENT ESTIVAL

Pour illustrer le comportement estival, nous avons représenté un évènement d'été d'une durée d'environ 3 heures avec une intensité très élevée (près de 60 mm/h en 5 minutes).

Les résultats ont montré que malgré la forte intensité de la pluie, le débit à la sortie du drain n'atteint pas 0.1 L/s. La pluie cumulée de cet épisode estival atteint les 25 mm.

Suite à ce constat, on comprend que durant l'été, après une longue période de sécheresse, le toit vert a une capacité de rétention maximale.

4.3 MODÈLE HYDROLOGIQUE

Les processus hydrologiques qui régissent le modèle de la toiture végétalisée sont représentés dans le logiciel SWMM (Storm Water Management Model) par différentes couches interagissant entre elles. Ces processus sont principalement l'infiltration, la percolation, l'évaporation et le ruissellement. Les mouvements d'eau dans les différentes couches composant la toiture végétalisée se basent sur un principe simple de transfert ou bilan d'eau : « *water balance* » tel qu'illustré sur le schéma ci-dessous. Dans le cas des toitures végétalisées, il n'y a généralement pas de ruissellement de surface. On parle plutôt de ruissellement au drain (à la base du matériau drainant).

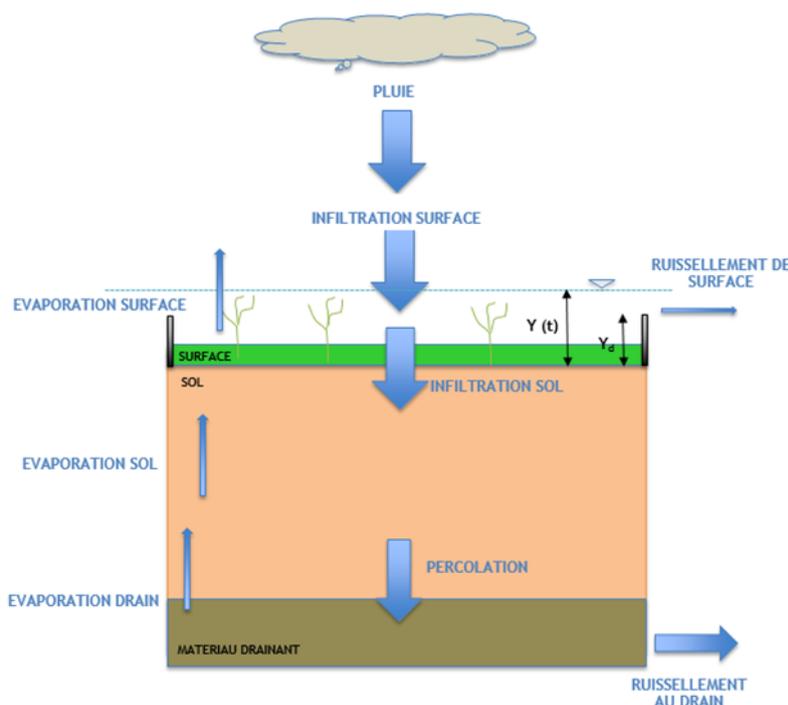


Figure 6 : Fonctionnement conceptuel d'une toiture végétalisée (coupe type)

4.3.1 MISE EN ŒUVRE DU MODÈLE

La mise en œuvre du modèle a tout d'abord consisté en la saisie des inputs nécessaires à la construction dudit modèle, à savoir la géométrie de la toiture, sa composition (paramètres physiques des couches de surface, sol et drainage) ainsi que les données pluviométriques et climatiques (taux d'évapotranspiration). Ensuite à procéder au calage du modèle et enfin à l'ajuster puis le valider.

Le point de départ de la simulation est un modèle initial représentant la toiture végétalisée et pour lequel une simulation sera réalisée avec les pluies enregistrées à la station Mirany. Ce modèle initial servira de modèle de

base pour la phase de calage et sera réutilisé pour les simulations avec le scénario de pluies stochastiques (défini plus bas). Une fois le modèle initial calibré et validé grâce aux pluies et débits observés, nous avons utilisé ce modèle pour lancer les simulations avec un scénario de pluies dites stochastiques. Ce sont des pluies générées par des outils mathématiques (modèle Cluster) capables de préserver les paramètres (moyenne, écart-type et autocorrélation) utilisés par un météorologue pour caractériser les pluies d'une région donnée (Consuegra, 2013).

Le calage a été effectué avec la méthode essai-erreur afin d'ajuster les paramètres non mesurés et qui ne peuvent pas être estimés de manière suffisante *à priori*. Les paramètres calibrés pour la couche de surface sont la fraction volumique de végétation et la rugosité de surface, alors que pour la couche de sol, la pente de conductivité et le potentiel matriciel au front d'humectation sont calibrés. Hormis son épaisseur, les paramètres de la couche de drainage (porosité et coefficient de rugosité) sont également calibrés puisque les fournisseurs de ce type de matériaux commerciaux ne communiquent en général pas ces caractéristiques.

Données relatives à l'évapotranspiration

En hydrologie on utilise le terme d'évapotranspiration pour exprimer la combinaison de l'évaporation directe à partir des surfaces d'eau libre et des sols nus et de la transpiration végétale (processus par lequel l'eau des végétaux est transférée dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau). (Mermoud, 2009).

Seuls les phénomènes d'évapotranspiration potentielle (ETP ou ET_0) et réelle (ETR) seront employés :

- L'ETP est l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol et abondamment pourvue en eau ;
- L'ETR est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturelle.

Pour la culture de référence, le gazon, on a : $ETR \leq ETP$. (Mermoud, 2009)

Le logiciel SWMM demande en input des valeurs journalières moyennes de l'évapotranspiration réelle qui ne sont nuancées que lorsque cette dernière est limitée par la disponibilité en eau dans les différentes couches qui caractérisent la toiture végétale. Faute de temps et de connaissances approfondies, des valeurs d'évapotranspiration potentielle ont été pris en compte. Les valeurs d'évapotranspiration réelle, qui pourraient être considérablement influencé par les conditions microclimatiques particulières d'une toiture ne sont pas connues au moment de la finalisation de ce rapport. Certains chercheurs (Kasmin, 2010) mettent en évidence la difficulté de paramétrer ce processus, d'autant plus que dans la plupart des modèles le type de végétation n'est pas pris en compte. Vu la complexité rencontrée pour transformer les taux d'ETP (dont nous disposons) en ETR, nous avons émis une hypothèse basée sur la littérature (Mermoud, 2009) qui stipule que pour le gazon (culture de référence) les taux d'ETP sont équivalents à des taux d'ETR. Notons toutefois que l'intensité de l'évapotranspiration ne change pas radicalement le comportement d'un toit vert (testé avec le modèle calibré), mais influence la durée de temps sec nécessaire pour rétablir la capacité de rétention maximale du substrat.

Données relatives à la précipitation

La précipitation, entrée sous la forme d'un hyétogramme de pluie, est la donnée d'entrée générant la réponse hydrologique de la toiture végétalisée. Rappelons que deux modélisations sont effectuées.

Pour la première modélisation de la toiture verte :

Les pluies de la station de Mirany ont été utilisées dans le but de valider par le calage les données de débits observés avec ceux simulés.

Pour la modélisation avec les pluies stochastiques :

Le point de départ pour la production des scénarii de précipitations est un travail de caractérisation des régimes de précipitations associés au climat actuel. Ce travail avait été débuté dans le cadre des modélisations effectuées pour le Canton de Genève par le biais d'une approche stochastique (Consuegra, 2013). Le détail de la démarche est présenté dans le document intitulé « *La question des débits de dimensionnement* » (Consuegra, 2013).

4.3.2 RÉSULTATS DE SIMULATIONS - PLUIES DE MIRANY

Le principal but de la simulation en continu avec les pluies de Mirany est de nous permettre d'une part de caler les paramètres du modèle pour reproduire au mieux les débits observés pendant une période commune d'enregistrement des pluies à la station Mirany, et de vérifier la consistance du modèle sur des événements pluvieux divers sélectionnés. Une liste des paramètres mesurés et calibrés du modèle (module LID uniquement) est visible dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Paramètres LID après calibration

	Paramètre	Valeur	Unité	Type
Surface	Hauteur des bermes	100	mm	mesuré
	Fraction vol. végétation	0.9	-	calibré
	Coeff. de rugosité (Manning)	0.15	-	calibré
	Pente de surface	0.12	-	mesuré
Substrat	Epaisseur	215	mm	mesuré
	Porosité	0.53	-	mesuré
	Capacité au champ	0.42	-	mesuré
	Point de flétrissement	0.13	-	théorique
	Conductivité hydr. à sat.	180	mm hr ⁻¹	mesuré
	Pente de conductivité	7	-	calibré
Drainage	Pot. mat. au front d'humectation	50	mm	calibré
	Epaisseur	50	mm	mesuré
	Porosité	0.35	-	calibré
	Coeff. de rugosité (Manning)	0.3	-	calibré

Résultats

Les résultats de la simulation en continu sont présentés sur la figure ci-dessous. La période de simulation est de janvier 2008 à mai 2014. A des fins de comparaison avec l'analyse précédente, nous avons zoomé sur la période de mai 2012 à mai 2014.

Il est important de souligner qu'une analyse de sensibilité a démontré qu'il était possible d'accepter plusieurs combinaisons des paramètres du modèle.

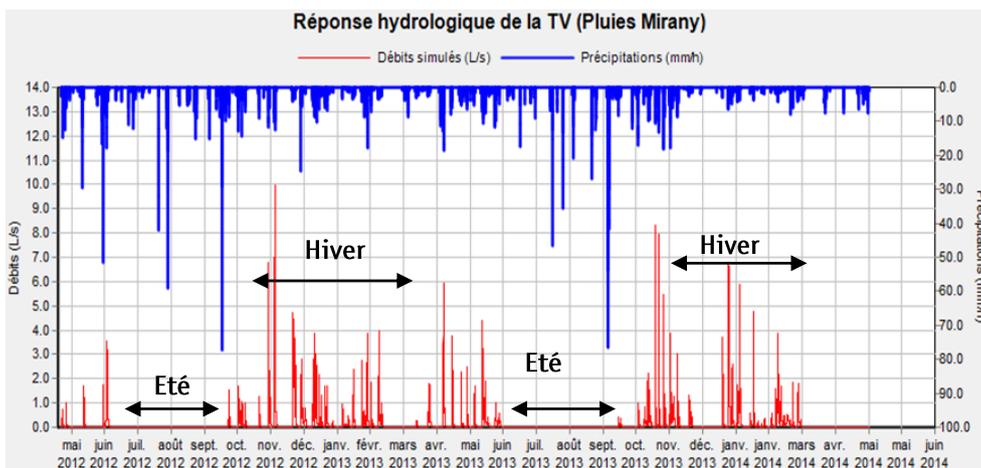


Figure 7 : Réponse hydrologique de la TV face à la pluie Mirany – zoom sur 2 ans

Le modèle SWMM ne restitue pas de débit au drain durant les périodes d'été. Nous portons à l'attention du lecteur que la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre une à deux crues isolées en été. Nous n'avons pas pu les simuler à cause de données pluviométriques manquantes pendant ces quelques périodes.

Durant les autres périodes de l'année, la réaction du toit vert est très similaire à celle observée à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable..** En effet, nous constatons ici un pic de débit de ruissellement au drain proche de 10 L/s aux alentours de novembre 2012. Les autres pointes de débits étant souvent inférieures à 8 L/s.

Pour mieux apprécier la qualité des simulations, les figures suivantes permettent de zoomer sur des périodes plus courtes et de constater la qualité des résultats obtenus.

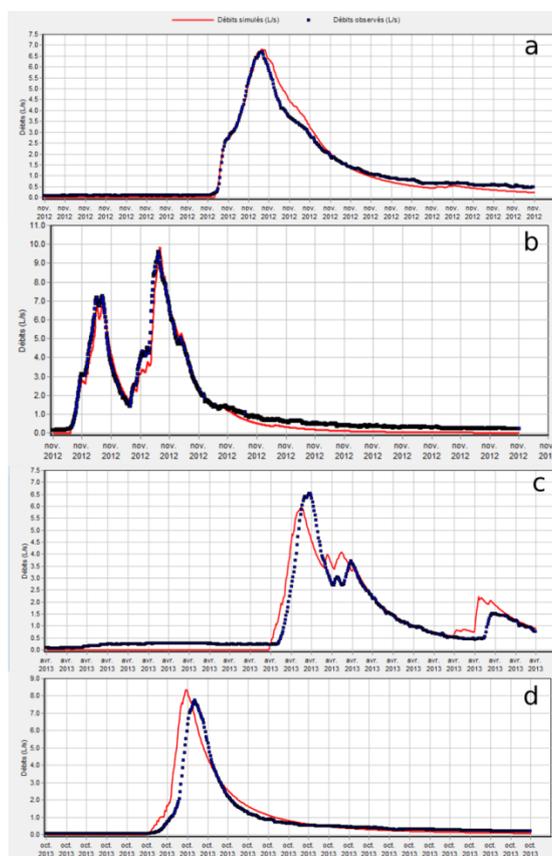


Figure 8 : Résultats du calage pour quatre événements pluvieux en novembre (a et b), à fin avril © et en octobre (d)

Bilan de la simulation avec les pluies de Mirany

Les résultats de calage étant satisfaisants, nous en venons maintenant à illustrer certains aspects pertinents du bilan hydrologique de la toiture végétale. La figure suivante résume de manière succincte les composantes de ce bilan.

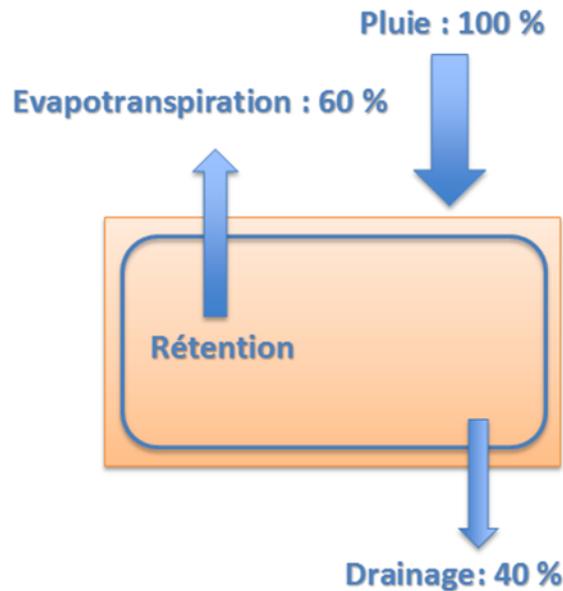


Figure 9 : Bilan sur 6 ans de l'efficacité hydrologique de la toiture végétale pour les pluies de Mirany.

4.4 SIMULATIONS AVEC LES PLUIES STOCHASTIQUES

Les paragraphes suivants présentent les résultats de simulations réalisées avec des pluies stochastiques. Les simulations ont été lancées sur une vingtaine d'années. Le même jeu de paramètres utilisé pour la simulation des pluies de Mirany a été repris. Le but étant ici de voir comment se comporte la toiture végétalisée avec des intensités de pluies beaucoup plus importantes et des durées plus longues.

4.4.1 RÉPONSES HYDROLOGIQUES DE LA TV

Le graphique suivant présente le hétérogramme des 20 ans de pluies et l'hydrogramme des débits simulés.

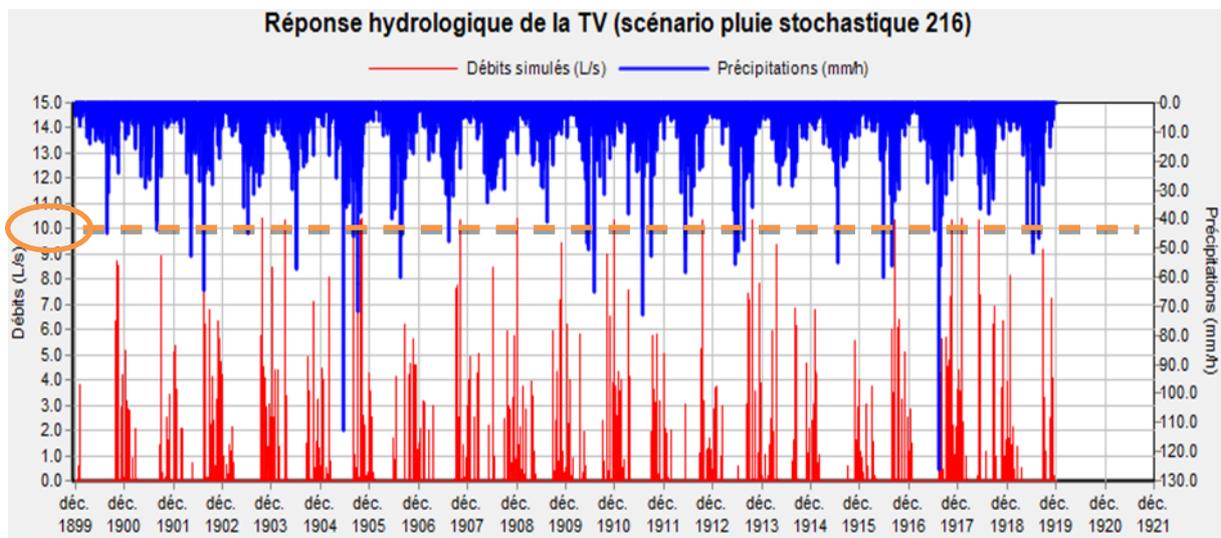


Figure 10 : Réponse hydrologique de la TV (scénario pluie stochastique 216) – Epaisseur drain = 50 mm

Les réponses de la toiture végétale les plus importantes sont observées durant les périodes hivernales. Nous remarquons aussi que les pics des débits de ruissellement ne dépassent jamais 10.5 L/s. Ce plafonnement s'explique par une des hypothèses déterminantes du modèle SWMM.

Pour confirmer ce plafonnement, nous avons lancé une simulation en multipliant par deux l'épaisseur de la couche de drainage (soit 100 mm au lieu de 50 mm) et en conservant tous les autres paramètres identiques.

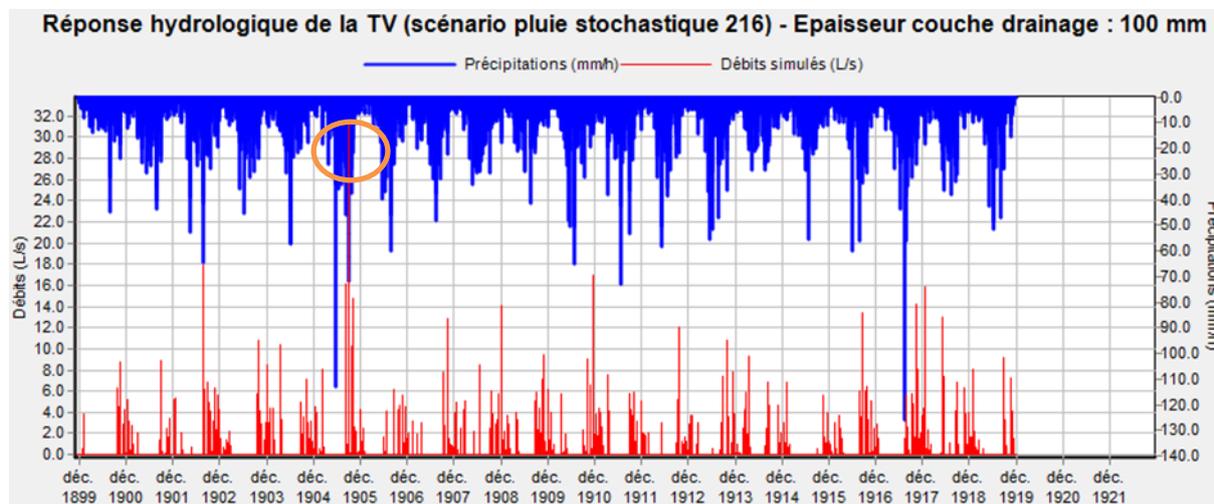


Figure 11 : Réponse hydrologique de la TV (scénario pluie stochastique 216) – 2paisseur drain = 100 mm

Nous constatons comme prévu, que le pic de ruissellement atteint les 31 L/s. L'hydrogramme ci-dessus montre que les 10.4 L/s sont dépassés plusieurs fois.

On en déduit l'importance de cette hypothèse lorsqu'il s'agit d'évaluer la capacité de la toiture végétale à limiter l'apport au drain à une quantité maximale imposée.

Le graphique suivant illustre l'évolution en fonction du temps de la teneur en eau du sol (nommé humidité sur le graphique), de l'évapotranspiration, du débit au drain et de la pluie durant une année représentative.

On constate que les teneurs en eau du sol sont très élevées en hiver et très basses en été. Lorsque la teneur en eau du sol dépasse la capacité au champ (42 %), il y a un apport au drain. En été, l'évapotranspiration est la plus forte, elle puise l'eau retenue dans le sol ce qui explique les teneurs en eau faibles, nettement inférieures à la capacité au champ.

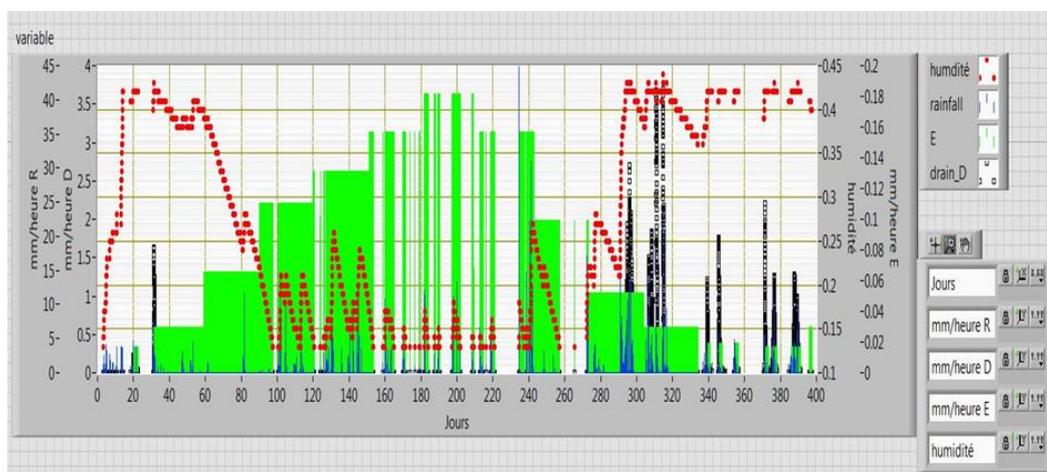


Figure 12 : Evolution en fonction du temps de la teneur en eau du sol, de l'évapotranspiration, du débit et de la pluie pour une année représentative

4.4.2 COMPARAISON AVEC UNE TOITURE DE RÉFÉRENCE

Pour mieux quantifier la réduction des rejets (au drain) d'une toiture végétale, il conviendrait de la comparer avec une toiture non végétalisée dite de référence. Idéalement, il aurait fallu disposer de mesures pluies-débits produites par une toiture conventionnelle. Ces informations faisant défaut, nous avons décidé de comparer la performance de notre toit vert avec celle d'une toiture géométriquement équivalente assimilée à une surface imperméable traditionnelle.

Le toit de référence que nous avons modélisé a les mêmes caractéristiques géométriques que la toiture végétale. Le taux d'imperméabilité est de 100%. Le coefficient de rugosité est égal à 0.03, pour représenter une toiture recouverte de gravier. Les apports calculés à l'exutoire de la toiture de référence devront être comparés aux débits restitués au drain de la toiture végétale.

Les résultats obtenus pour cette toiture conventionnelle sont présentés ci-dessous et doivent être comparés avec ceux de la Figure 10.

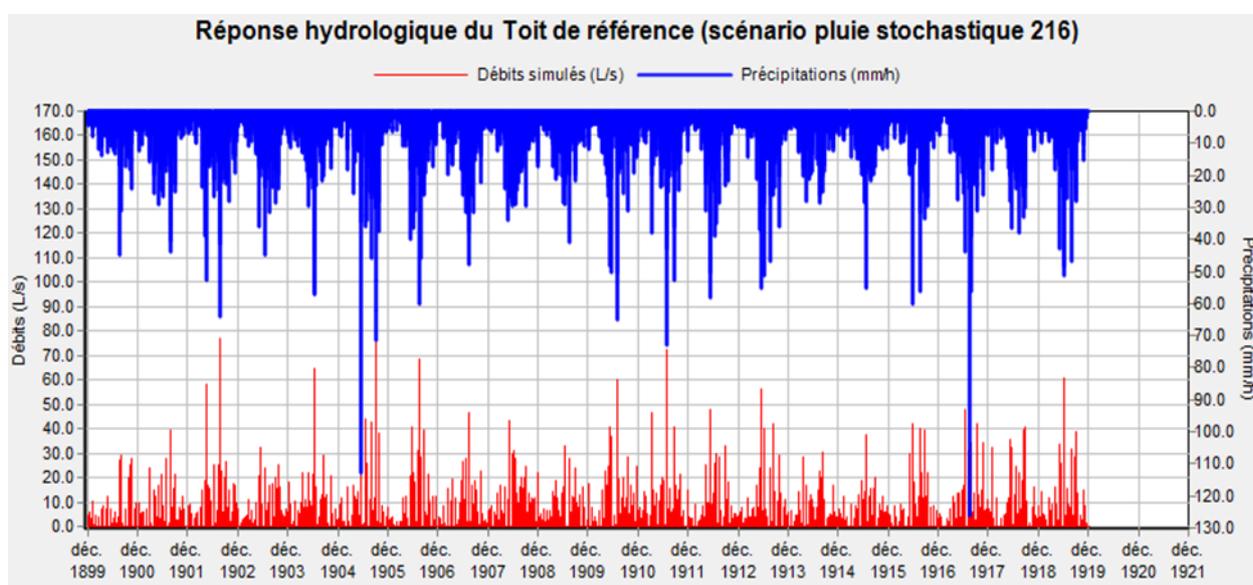


Figure 13 : Réponse hydrologique du toit de référence – scénario de pluies stochastiques

On observe qu'il y a des débits restitués au drain durant toute la période de simulation. Il n'existe pas, comme pour le toit vert, de période durant laquelle le débit est très faible. On note également que la majorité des pointes atteignent les 20 L/s, certains pics dépassent même les 70 L/s.

La figure suivante représente schématiquement le bilan des deux toitures analysées.

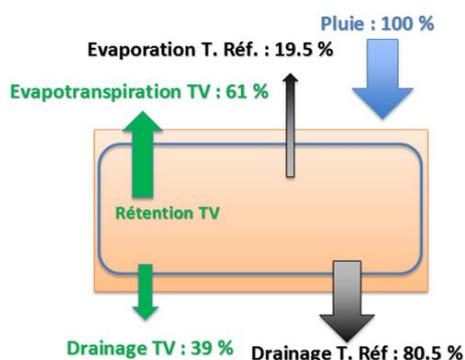


Figure 14 : Bilan de l'efficacité hydrologique sur 20 ans de la TV et du toit de référence

Le graphique suivant montre les pointes de débits du toit vert et du toit de référence pour un évènement estival (août). L'évènement pluvial représenté est précédé de 10 jours de sécheresse.

En début d'évènement, lorsque le pic de ruissellement de la toiture de référence avoisine les 35 L/s, la toiture végétalisée ne restitue aucun débit. Plus tard, quand le débit de pointe du toit de référence monte à 24 L/s, le toit vert ne rejette que 6 L/s. **Il y a une réduction de 75 % de la pointe de débit en été.**

Le pic de ruissellement du toit de référence coïncide tout le temps avec le pic de la pluie car ce toit de référence n'a aucune capacité de rétention. En revanche, le pic de restitution au drain du toit vert est décalé et cette restitution s'étale dans le temps. Ce qui est un indicateur de la capacité de rétention de la toiture.

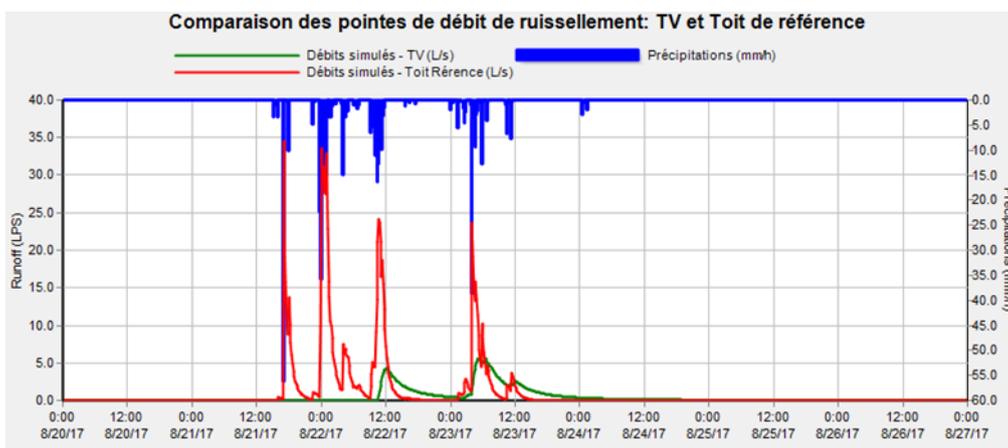


Figure 15 : Comparaison des pics de ruissellement de la TV et du toit de référence – Evènement estival

Ce graphique montre les pointes des débits du toit vert et du toit de référence pour un évènement hivernal.

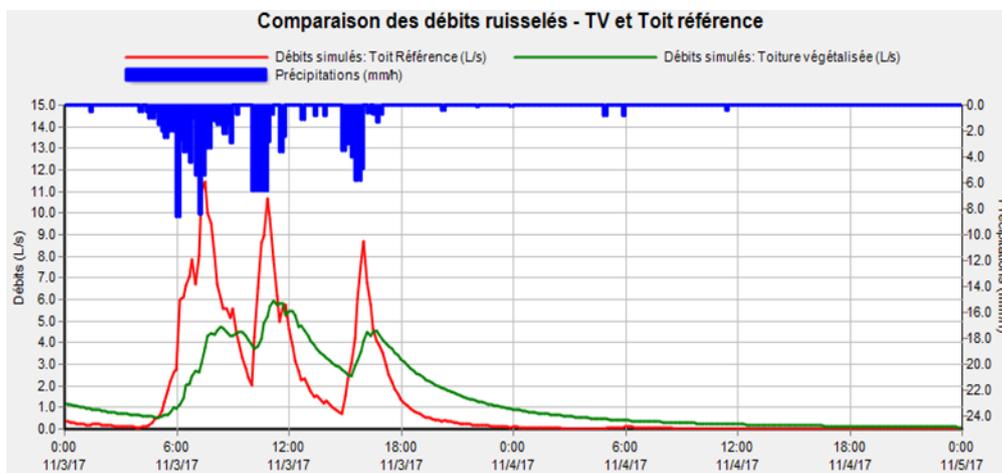


Figure 16 : Comparaison des débits de ruissellement de la TV et le toit de référence – Evènement hivernal

Force est de constater qu'en hiver le toit vert affiche une capacité de rétention intéressante mais de moindre efficacité que celle disponible en été. Notez que les intensités maximales de la pluie avoisinent les 8 mm/h. Le débit de pointe de 11,5 L/s de la toiture de référence diminue à 6 L/s pour le toit vert. **Il y a une réduction de 48 % de la pointe de débit en hiver.**

5 COMPARAISON DE L'EFFICACITÉ HYDROLOGIQUE DE 4 TOITURES VÉGÉTALISÉES EN RÉGION GENEVOISE

L'objectif de cette section est l'analyse des débits mesurés sur trois autres TVs en région genevoise : celle du bâtiment Europe, de la Haute école d'art et de design (HEAD) ainsi que la toiture végétalisée extensive des Hôpitaux universitaires de Genève (HUGext). Ces trois toitures sont de types extensives, contrairement à celle du collège de la Seymaz, qui est de type intensive. Le comportement hydrologique entre ces quatre toitures du printemps à l'automne 2015 est analysé. Les données à disposition sont limitées à cette période, et ne sont pas disponible pour le collège de la Seymaz, c'est pourquoi le modèle hydrologique décrit dans la section précédente est utilisé afin de reproduire le comportement attendu de la toiture. Dans une deuxième partie, le même modèle que celui utilisé pour la Seymaz est paramétré pour les autres toitures, ceci afin de simuler ces toitures et d'évaluer leur comportement hydrologique en termes de laminage des débits et de rejets au drain pour une période plus longue que celle couverte par les données. Ces modèles sont testés par différentes pluies synthétiques de 20 ans reproduisant une dynamique de précipitation conforme à celle observée jusqu'à lors en région genevoise.

5.1 DESCRIPTION DES TOITURES ET DONNÉES À DISPOSITION

Les toitures végétalisées Europe, HEAD et HUGext ont des surfaces de 540, 600 et 1125 m² respectivement, et sont toutes de type extensif, c'est-à-dire composées d'une couche de substrat peu épaisse (moins de 150 mm). Contrairement à la TV du collège de la Seymaz (intensive), ces TVs n'ont pas de couche de drainage sous le substrat, qui repose directement sur un géotextile et un film d'imperméabilité (à confirmer pour HUGext). L'évacuation de l'eau s'effectue essentiellement par des évacuateurs de surface, ce qui implique que le substrat soit saturé (ou du moins que la capacité d'infiltration soit dépassée) avant qu'un écoulement de surface amène le surplus d'eau vers les évacuateurs connectés au drain. Le type de substrat varie en fonction de la toiture, celle de l'Europe étant composé de terre végétale avec un mélange de graviers de de pouzzolane, et celle de la HEAD de tuiles concassée (75%), de compost (15%) et de pierre (10%). La composition de la toiture extensive des HUG n'est pas connue des auteurs. Le tableau suivant résume les paramètres pertinents connus pour ces trois toitures :

Tableau 2 : Propriétés physiques mesurés ou estimées des toitures végétalisées

		Europe	HEAD	HUGext
Épaisseur de substrat	[mm]	100	125 (70-180)	100
Porosité	[-]	0.2 ¹	0.43 ²	ND
Capacité au champ	[-]	0.104 ¹	ND	0.28 ¹
Point de flétrissement	[-]	0.03 ³	0.03 ³	0.03 ³

¹ Communication M. Fournier

² Rapport TV HEAD, E. Renaud

³ Valeur typique selon P. Boivin

ND Non déterminé

Les données à disposition sont l'enregistrement continu (pas de temps de 10 min) du débit sur l'un des évacuateurs de chaque toiture, de mi-avril jusqu'à fin septembre 2015 (sauf pour HUGext, fin de l'enregistrement le 12 septembre). Une série de précipitation est également disponible pour cette même période (pas de temps identique aux mesures de débit), mesuré à l'aide d'un pluviomètre situé sur la toiture de l'HEPIA, au centre de Genève. Le débit et la pluviométrie pour la toiture du collège de la Seymaz n'étant pas disponible pour cette même période, les débits calculés avec le modèle décrit dans le rapport intermédiaire « Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée » (Consuegra, N'Gaidé Diouf et Queloz, 2015) ont été utilisés avec la même pluviométrie enregistrée pour les autres toitures.

5.2 COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES TOITURES

La **Figure 1** présente la pluviométrie ainsi que les débits spécifiques (en mm/h) observés pour chacune des toitures. On constate que tous les toits répondent aux mêmes évènements de pluie et de manière simultanée, mais avec des intensités différentes. Seul la TV des HUG montre des rejets supplémentaires au milieu de l'été après des pluies relativement conséquentes (25 mm), alors que les autres toitures semblent pouvoir absorber ces précipitations. Sur l'entier de la période observée, la part des précipitations évacuées au drain est respectivement de 0.15, 0.28, 0.38 et 0.45 pour la Seymaz, Europe, HEAD et HUGext. Cette statistique est visible à l'échelle mensuelle sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

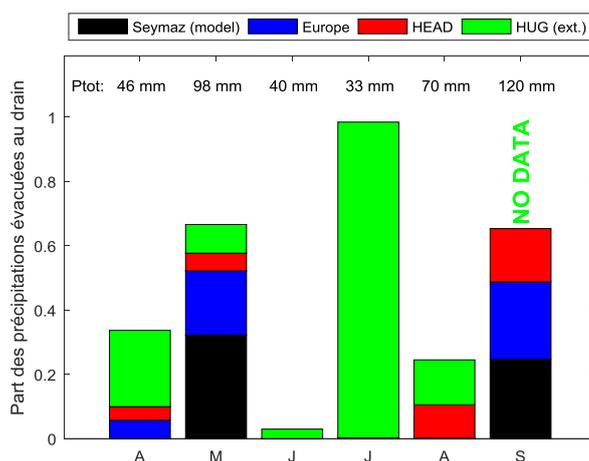


Figure 17 : Part des précipitations évacuées au drain par mois

Malgré la faible épaisseur de la couche de substrat des TVs extensives, elles ont une capacité de rétention suffisante pour contenir les précipitations estivales, même conséquentes (20 mm en 24h par exemple), pour autant que la capacité de rétention puisse être restaurée grâce à l'évapotranspiration (pas de percolation puisqu'il n'y a pas de drainage de fond). Par exemple, lors des deux évènements pluvieux du 23 et 25 juillet qui ont occasionnés des débits pour la TV des HUG, la première précipitation a suffi à saturer le substrat des HUG, mais était insuffisante pour saturer celui de l'Europe, et a fortiori ceux de la HEAD et de la Seymaz. La période de deux jours sans précipitation qui a suivi n'a pas eu d'influence notable sur la teneur en eau du sol du substrat de la HUG (contrairement aux autres TVs) si bien que la toiture a répondu de manière conséquente et rapide à la précipitation du 25 juillet.

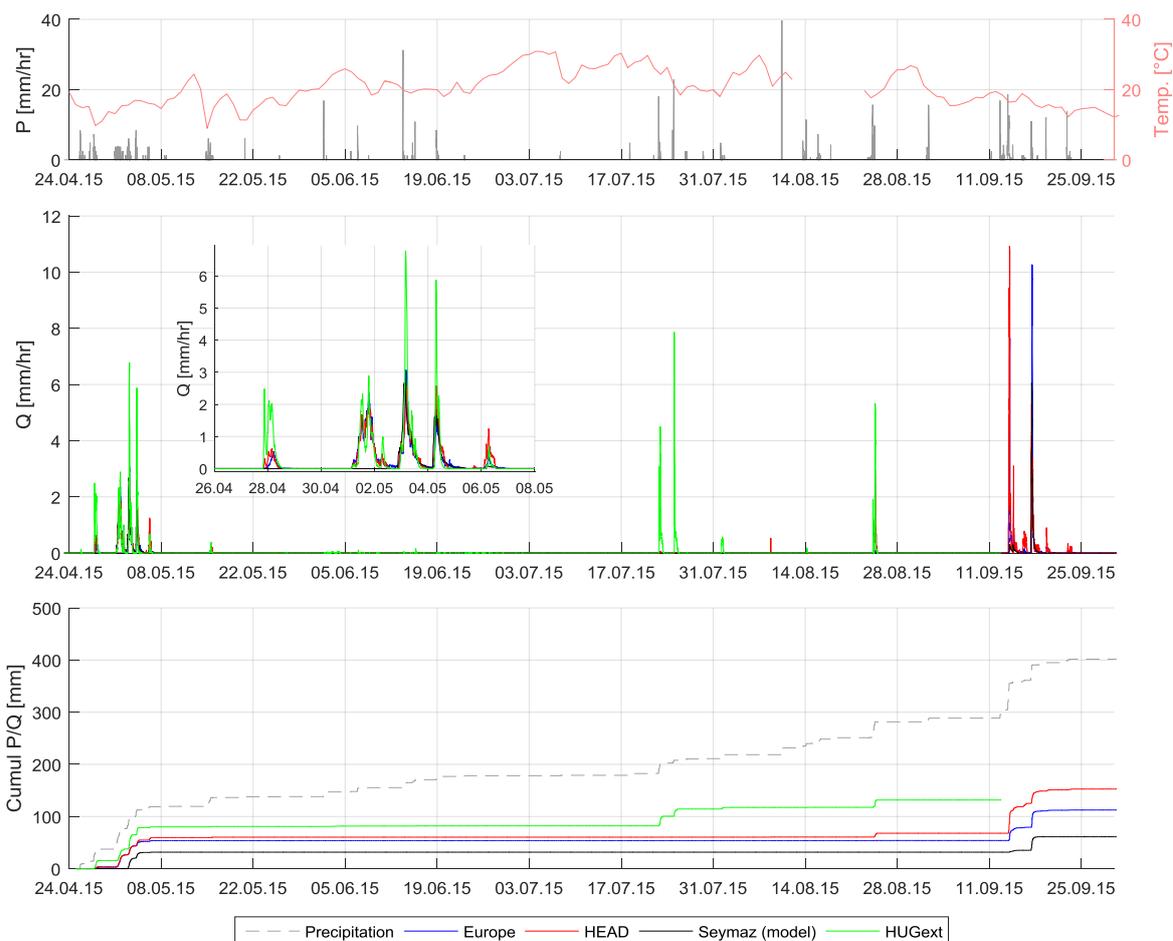


Figure 1 : Pluviométrie, température, débits et débits cumulés pour les quatre toitures. Cartouche : zoom sur la période du 25 avril au 8 mai.

La cartouche de la **Figure 1** montre que, exception faite de la TV des HUG pour laquelle les débits observés sont systématiquement plus importants, les intensités de débit des différents toits sont similaires une fois que le substrat est saturé en eau, comme c'est le cas pour le troisième et le quatrième pic de débit. Aucun débit n'est observé au préalable dans le cas de la Seymaz, le substrat n'étant pas encore saturé.

5.3 MODÉLISATION DES TOITURES EXTENSIVES

La modélisation des toitures extensives Europe, HEAD et HUG s'est faite par l'intermédiaire du logiciel EPA SWMM (Release 5.1.010), à l'instar du modèle développé pour le collège de la Seymaz, détaillé dans la section précédente. La différence principale de la paramétrisation des modèles des toitures extensives par rapport à la TV extensive de la Seymaz est due à l'absence de zone de drainage sous le substrat, et donc une évacuation des eaux pluviales uniquement par un écoulement à la surface du substrat (ou de la couche de végétation) jusqu'aux évacuateurs. On notera que même si cette étude ne s'intéresse nullement à la qualité de l'eau évacuée, cette différence de configuration entre le type de TV intensif/extensif (du moins pour les exemples traités ici) peut avoir des conséquences importantes sur la composition chimique des eaux rejetées. L'absence de couche de drainage dans SWMM n'est pas directement possible, mais en définissant une épaisseur très faible de cette couche et/ou en lui attribuant une rugosité importante, on arrive à très fortement limiter le débit sortant, qui devient nul par approximation numérique lors du calcul.

Pour chacune des toitures, la calibration du modèle s'est faite à partir d'un set de paramètres géométriques et physiques initial tiré de mesures, d'estimations et de la littérature. Les paramètres les plus sensibles ont

ensuite été identifiés, et les débits modélisés ont été ajustés visuellement sur les débits mesurés par tests successifs (méthode « trial and error ») des paramètres sensibles pertinents. Le tableau suivant résume les paramètres initiaux et calibrés pour chacune des toitures.

Tableau 3 : Récapitulatif des propriétés et des paramètres de calibration des toitures analysées

	Europe		HEAD		HUG (ext.)	
	Val. initiale	Val. calibrée	Val. initiale	Val. calibrée	Val. initiale	Val. calibrée
Surface (m2)	540		650		1125	
Largeur caract. (m)	12		13		25	
Zone de surface						
Hauteur bermes (mm)	100	55	0.5	10	10	0.1
Rugosité (-)	1	1	1.5	2	1.5	0.6
Pente (%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.15
Zone de substrat						
Profondeur (mm)	100	100	125	125	100	100
Porosité (-)	0.2	0.2	0.43	0.2	0.3	0.11
Cap. au champ (-)	0.104	0.104	0.3	0.1	0.28	0.07
Pt. de flétrissement (-)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Cond. hydr. (mm/hr)	10	100	200	200	200	200
Zone de drainage						
Profondeur (mm)	0.1	0.1	0.1	0.001	0.1	0.001
Porosité (-)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Rugosité (-)	0.3	10	0.1	0.1	0.1	0.1

Note: ni la toiture de la HEAD, ni celle de l'Europe n'ont à proprement parlé de hauteur de berme. On considère une valeur > 0 pour permettre une accumulation d'eau en surface.

Paramètres mesurés

Contradiction mesures

On constate que seul le modèle pour la TV de l'Europe repose uniquement sur les paramètres mesurés et estimés, et n'a pas subi d'ajustement conséquent pour obtenir une reproduction adéquate des débits mesurés.

Pour la TV de la HEAD et des HUG, la différence principale entre le set de paramètres calibré et initial est la capacité de rétention réelle du substrat. En effet, selon les mesures et estimations de la porosité et du point de flétrissement (notons que la capacité au champ est peu sensible pour les toitures extensives puisqu'il n'y a pas de percolation dans la couche drainante, rendant également la conductivité hydraulique très peu sensible), la capacité de rétention théorique est nettement plus importante qu'il n'y paraît après l'ajustement effectué par calibration. Même après une longue période sèche avec une évapotranspiration importante (engendrant une teneur en eau proche du point de flétrissement), le volume de précipitation nécessaire afin d'induire un débit est nettement plus faible que ce que suggèrent les mesures. Cette différence peut également s'expliquer par une épaisseur de substrat réelle plus faible, résultant par exemple d'un tassement de la couche après sa mise en place et sa mesure. Il faut également mentionner que pour le cas de la toiture de la HEAD, l'épaisseur du substrat de 125 mm représente une moyenne, car la couche a en réalité une épaisseur de 70 mm sur les

bords, avec la présence d'un monticule au centre jusqu'à 180 mm d'épaisseur. Cette géométrie ne peut être représentée directement de manière adéquate par le modèle utilisé.

Le bilan total de l'écoulement par rapport aux précipitations dépend en majeure partie de la capacité de rétention du substrat, alors que la dynamique des écoulements est fortement liée à la couche de surface (surface du substrat, avec présence de végétation), représenté par une pente de surface, une rugosité, une hauteur de berme et une densité de végétation (peu sensible). La pente de surface n'étant pas forcément représentative de la pente du toit, ce paramètre est utilisé en combinaison avec la rugosité pour ajuster la dynamique des débits simulés avec les débits mesurés. La hauteur des bermes a uniquement une influence notable sur le premier pic d'écoulement après une période sèche. L'écoulement de surface n'a lieu qu'une fois la hauteur des bermes atteintes, ce qui engendre une « perte » ayant lieu juste après que le substrat soit saturé au débit d'un nouvel évènement pluvieux. Les débits mesurés et simulés pour les trois toitures sont visibles dans la

Erreur ! Source du renvoi introuvable..

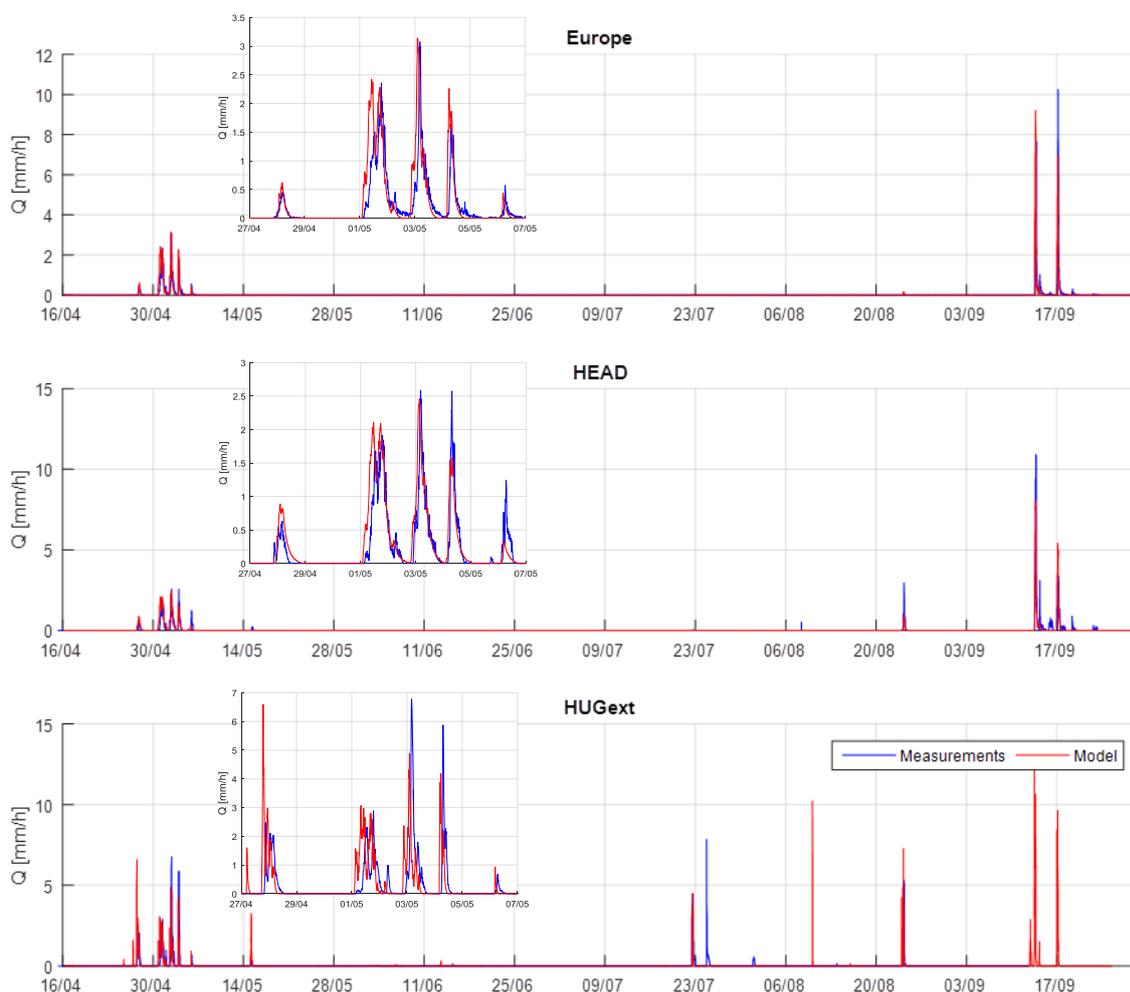


Figure 19 : Débits mesurés et simulés pour les TVs Europe, HEAD et HUG (ext.). Les cartouches montrent un agrandissement de la période avril-mai 2015.

5.4 SIMULATION À LONG TERME AVEC DES PLUIES SYNTHÉTIQUES

Trois séries de précipitations synthétiques d'une durée de 20 ans chacune, représentatives de la région genevoise ont été utilisées pour alimenter les modèles calibrés des quatre toitures. Les trois graphiques de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** décrivent la fréquence des débits de pointes calculés pour chaque évènement pluvial selon les trois séries de précipitations (échelle logarithmique en ordonnée). On remarque que le comportement de la toiture du collège de la Seymaz et celle de la HEAD sont similaires, et représentent

les meilleurs candidats en terme d'efficacité hydrologique parmi les quatre toitures étudiées. Il est à souligner que contrairement à ce qui a été observé et décrit dans la section précédente lors du calage du modèle pour le toit du collège de la Seymaz, il n'y a pas de plafonnement de débit (autour de 10 L/s) du modèle de la toiture de la Seymaz, puisque des débits jusqu'à près de 70 L/s ont été observés. Ceci est apparemment dû à une correction du modèle SWMM intervenu entre les deux versions utilisées du logiciel (release et 5.1.006 et 5.1.010). Les débits de pointe de la toiture du bâtiment Europe sont sensiblement plus élevés que pour HEAD et Seymaz, même si la part de la précipitation évacuée au drain est plus faible pour la toiture de la HEAD (coefficients de ruissellement pour la pluie 202 de 0.42, 0.48, 0.50 et 0.65 pour Seymaz, Europe, HEAD et HUGext, respectivement). Les performances de la toiture des HUG sont nettement inférieures, ce qui a déjà pu être constaté par la fréquence et l'intensité des débits mesurés nettement supérieur aux autres toits (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Figure 1**). La période de retour d'un débit de pointe de 20 L s⁻¹ ha⁻¹ est proche d'une année pour les TVs Seymaz, Europe et HEAD, alors qu'elle est de l'ordre de grandeur du mois pour la TV des HUG. D'un point de vue de la modélisation, la différence entre ces toits s'explique par une paramétrisation engendrant un volume de rétention maximal pour la HEAD, suivi par Europe et finalement HUG. La dynamique de l'écoulement est contrôlé par les paramètres de la couche de surface, qui conduisent à un laminage maximal pour la HEAD et minimal pour les HUG également.

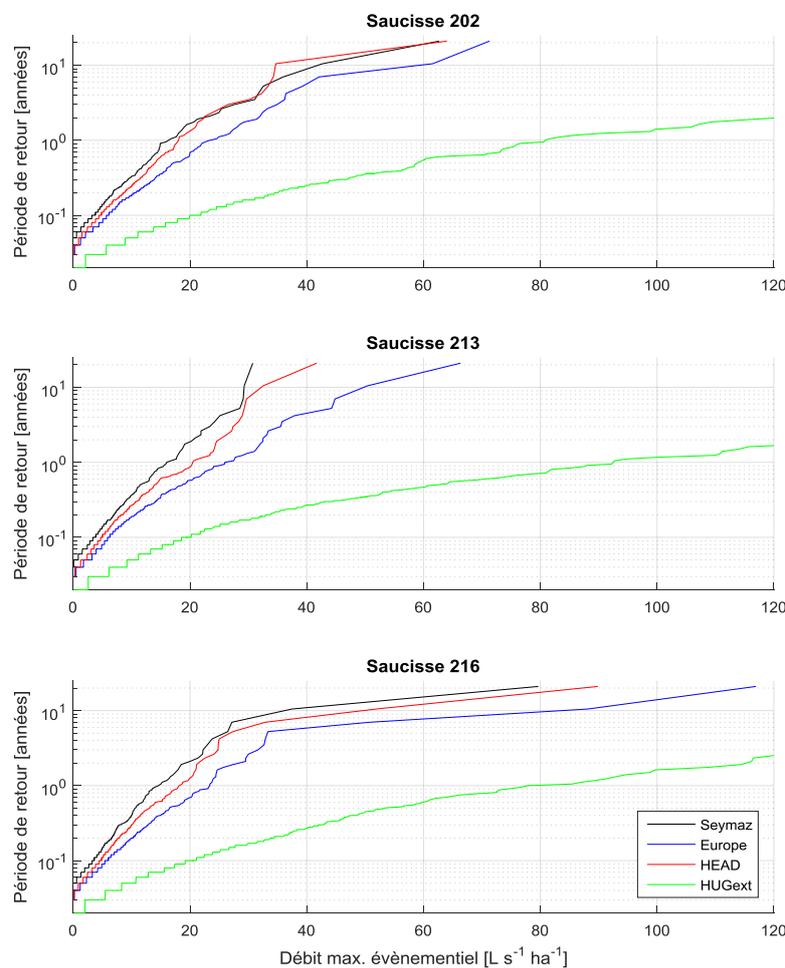


Figure 20 : Analyse statistique des débits de pointes observés sur quatre toitures végétalisées avec trois précipitations synthétiques.

Au vu de la très courte période pour lesquelles des données sont disponibles, la calibration de ces modèles (sauf Seymaz) et l'interprétation des résultats obtenus avec ces pluies stochastiques sont à prendre avec prudence.

6 SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Les mesures effectuées sur toutes les toitures végétalisées présentées dans ce rapport montrent clairement que ces ouvrages sont efficaces afin de limiter les débits évacués par rapport aux intensités de pluie reçue. On observe également que l'évapotranspiration représente une part importante du bilan hydrique annuel. Le substrat permet donc de retenir les précipitations, et de les restituer progressivement dans l'atmosphère par évapotranspiration. En hiver, lorsque l'évapotranspiration est très faible, la période entre deux précipitations ne permet en général pas d'évaporer toute l'eau du substrat et de rétablir une capacité de rétention maximale, de telle sorte que la réponse du drain à une précipitation est plus rapide, plus fréquente et plus importante. En été par contre, un débit dans le drain n'est observé qu'occasionnellement que pour un des toits verts étudiés.

Bien que les performances des différents toits ne soient pas radicalement différentes, la meilleure efficacité en termes de limitation de débit est observée pour le toit vert intensif du collège de la Seymaz. Une différence fondamentale en termes de fonctionnement entre le type intensif et extensif des toitures étudiées réside dans le fait que le substrat doit être saturé avant qu'il y ait écoulement sur la surface du substrat puis dans les drains pour les toits verts extensifs, alors que pour la toiture intensive, la présence d'une couche de drainage permet un écoulement sous la couche de substrat. Dans ce dernier cas, la capacité au champ et la conductivité hydraulique de la couche de substrat, ainsi que les paramètres géométriques et d'écoulement (rugosité) dans la couche de drainage définissent la réponse de l'écoulement dans le drain. Pour les toits verts extensifs, seuls la capacité de rétention totale (i.e. l'épaisseur du substrat et la porosité) et les paramètres d'écoulement sur la surface du substrat (rugosité et hauteur de bermes) déterminent le volume de précipitation nécessaire avant qu'un écoulement soit observé ainsi que la dynamique de cet écoulement. On remarque donc que le comportement d'un toit vert extensif (excluant pour les cas d'étude de ce rapport tout écoulement par le fond) est similaire à une toiture piscine, avec un volume de stockage défini et un écoulement activé une fois seulement que la précipitation a dépassé la capacité de stockage. Malheureusement, l'absence de données pour une toiture de référence (sans substrat) n'a pas permis de comparaison directe avec des toitures végétalisées, en particulier quant à la dynamique de l'écoulement une fois la capacité de stockage atteinte et le temps nécessaire afin de rétablir une capacité de stockage maximale par évaporation ou par transpiration.

Dans une optique de dimensionnement d'ouvrage, le paramètre principal à ajuster est la capacité de stockage du substrat, aussi bien pour les toits verts intensifs qu'extensifs. Si la toiture peut être construite afin d'assurer le stockage de la pluie de dimensionnement, le type extensif peut s'avérer suffisant et les propriétés géométriques influençant l'écoulement de surface et la dynamique de l'écoulement dans le drain (rugosité de surface, position des évacuateurs, pente de surface) sont des paramètres relativement peu significatifs puisqu'aucun écoulement ne sera généralement observé. Toutefois, si on considère une série de précipitations intervenant à des intervalles de temps relativement restreints ou si la capacité de stockage est inférieure à la pluie de dimensionnement, on préfère alors le type intensif avec des évacuateurs dans la couche de drainage qui permettront un écoulement plus progressif et une « vidange » plus rapide de la couche de substrat. Il est finalement à retenir que même si la capacité de stockage est dans une certaine mesure relativement facile à estimer grâce à un ensemble de paramètres géométriques et physiques du sol, ceux qui contrôlent la dynamique de l'écoulement sont difficilement quantifiables sans avoir recours à une calibration de modèle basé sur des mesures d'études de cas.

BIBLIOGRAPHIE

6.1 BIBLIOGRAPHIE

- Aménagement et eaux pluviales sur le territoire du Grand Lyon. Guide pratique.* 2008. Communauté urbaine de Lyon, direction de l'Eau. Lyon, France.
- Arnaud, P., et J. Lavabre. «La modélisation stochastique des pluies horaires et leurs transformations en débits pour la prédétermination des crues.» *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 2000: 441-462.
- Bennis, Saad. *Hydraulique et hydrologie.* 2009.
- Boucher. «Water and Science.» 2005.
- Burszta-Adamiak, E., et M. Mrowiec. «Modelling of green roofs's hydrologic performance using EPA's SWMM.» *Water Science and Technology*, 2013.
- Carbone, M., G. Garofalo, G. Nigro, et P. Piro. «A conceptual model for predicting hydraulic behaviour of a green roof.» *Procedia Engineering*, 2014.
- Consuegra, David. «La question des débits de dimensionnement.» 2013.
- Cottier, R. *Hydrologie de base pour l'ingénieur.* 2012.
- Diouf, Fatimétou N'Gaidé. «Analyse de l'efficacité hydrologique d'une toiture végétalisée.» 2015.
- Douglas, Ellen M., Jennifer M. Jacobs, David M. Sumner, et Ram L. Ray. «A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for florida land cover types.» *Journal of Hydrology* 373, n° 3-4 (July 2009): 366-376.
- Etat de Genève. *Gestion des eaux non polluées. Méthodes simplifiées pour le dimensionnement et la conception des ouvrages de rétention.* Genève, 2004.
- Stovin, Virginia, Nigel Dunnett et Adrian Hallam. «Green roofs – getting sustainable drainage off the ground.» 2007. Novatec'2007
- Johnston, Chris, et Kathryn Mc Creary. «Vancouver Public Library green roof monitoring project.» *Public works and Government Services Canada*, 2006.
- Kasmin, H. «Towards a Generic rainfall -runoff model for green roofs with HYDRUS 1D.» *Journal of Hydrology* , 2010: 358.
- Lamera, C., G. Becciu, M.C. Rulli, et R. Rosso. «Green roofs effects on the urban water cycle components.» *Procedia Engineering*, 2013.
- Lawlor. «Water and Science.» 2006.

- Locatelli, Luca, Ole Mark, Peter S. Mikkelsen, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Marina B. Jensen, et Philip J. Binning. «Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications.» *Journal of Hydrology*, 2014.
- Mahoney, Joanne M. Onondaga County's green infrastructure program. 2013. Eastside TNT Meeting 2013.
- Marasco, Daniel E., Patricia J. Culligan, et Wade R. McGillis. «Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City.» *Ecological Engineering* 84 (2015): 451-462.
- Mentens, J., et D. Raes. «Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century.» *Landscape and Urban Planning*, 2006: 77, 217-226.
- Mermoud, André. *Dynamique de l'eau du sol*. 2006.
- Mermoud, André. *L'évaporation et l'interception*. Lausanne, Lausanne, 2009.
- Musy, Andre. *Evaporation et Interception*. Genève, Genève, 2009.
- Musy, André, et C. Higy. *Hydrologie appliquée*. 1999.
- Musy, André, et Marc Soutter. *Physique du sol*. 1991.
- Ollier, et Poirée. «L'eau dans le sol.» 1981.
- Oudin, Ludovic, et al. «Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling.» *Journal of Hydrology*, n° 303 (2005): 290-306.
- Rivard, Gilles. *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain: Concepts et applications*. 2005.
- Roy. «Water and Science.» 2006.
- She, Nian, et Joseph Pang. «Physically Based Green Roof Model.» *Journal of hydrologic engineering* 15, n° 6 (2010): 458-464.
- Stovin, Virginia, Simon Poë, et Christian Berreta. «A modelling study of long term green roof retention performance.» *Journal of Environmental Management*, 2013.
- Vertessy R.A, et H. Elsenbeer. «Distributed modeling of storm generation in an Amazonian rain forest catchment: effects of model parametrisation.» *Water Resources Research*, 1999: 35, 2173-2187.
- Vesuviano, Gianni, et Virginia Stovin. «A Generic Hydrological Model for a Green Roof Drainage Layer.» *Water Science & Technology* 68, n° 4 (2013): 769-775.
- Vesuviano, Gianni, Fred Sonnenwald, et Virginia Stovin. «A two-stage storage routing model for green roof runoff detention.» *Water Science and Technology*, 2013.
- Woert, Van. *Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope and Media Depth*. 2005.