

ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DE TOITURES VÉGÉTALISÉES : OBSERVATIONS ET MODELISATION

David RAMIER⁽¹⁾, Emmanuel BERTHIER⁽¹⁾, Didier GALLIS⁽¹⁾, Antoine DUSSUCHALE⁽¹⁾, Pierre PINTA⁽¹⁾,
Pierre-Antoine VERSINI^(2, 3), Bernard de GOUVELLO^(2, 3)

⁽¹⁾CETE IF, ERA 35, 12 rue Teisserenc de Bort 78192 Trappes - e-mail : david.ramier@developpement-durable.gouv.fr,
emmanuel.berthier@developpement-durable.gouv.fr, didier.gallis@developpement-durable.gouv.fr,
antoine.dussuchale@developpement-durable.gouv.fr

⁽²⁾CSTB/LEESU, 6-8 avenue Blaise Pascal 77455 Marne-la-Vallée - e-mail : versinip@leesu.enpc.fr,
bernard.degouvello@leesu.enpc.fr

Les toitures végétalisées sont devenues une technique de gestion des eaux pluviales de plus en plus diffusée. Afin d'optimiser l'utilisation de cette technique, il est nécessaire de quantifier ses performances vis-à-vis du ruissellement, d'appréhender la variabilité de ces dernières et fournir un outil d'aide au choix de toitures les plus adaptées en fonction d'objectifs définis de gestion des eaux pluviales. Pour cela, un suivi de deux ans a été réalisé sur 6 différentes toitures végétalisées. Ce suivi a permis de confirmer la capacité des toitures à diminuer le ruissellement mais a aussi mis en évidence les fortes variations inter-événements des capacités de rétention, suivant les saisons et le type de la toiture. A partir des données acquises lors de ce suivi, un modèle fonctionnel nommé FAVEUR-Modèle a été développé. Ce modèle préfigure la base de l'outil d'aide au choix de toitures végétalisées.

Mots clefs : toitures végétalisées, eaux pluviales, observations, modélisation

Introduction

Les toitures végétalisées connaissent depuis plusieurs années en France un fort développement (plus de 1 million de m² installés en 2011). La maîtrise d'ouvrage, publique et privée, a été séduite par ces infrastructures, récentes dans l'espace urbain, associant *a priori* des vertus environnementales et économiques en termes de contribution à la diminution de l'îlot de chaleur urbain, d'amélioration de la qualité de l'air extérieur, d'aménités paysagères, d'isolation thermique et acoustique, d'allongement de la durée de vie de l'étanchéité. Les gestionnaires de réseaux d'eaux pluviales incitent également à la mise en place de toitures végétalisées afin de diminuer le ruissellement et réduire les débits de pointe.

Toutes les études tendent, en effet, à montrer que les toitures végétalisées extensives sont efficaces pour la diminution du ruissellement. Cet abattement du ruissellement est dû au stockage dans le substrat et à l'évapotranspiration. Ainsi une toiture végétalisée permet de diminuer le ruissellement de 20 à 40 % par rapport aux toits non-végétalisés, auto-protégés (avec l'étanchéité comme unique protection) ou ayant des graviers [Carter, Rasmussen, 2007 ; Mentens *et al.*, 2006 ; VanWoert *et al.*, 2005]. Cependant la capacité des toitures végétalisées à abattre le ruissellement serait maximum pour les événements faibles (en volume) et les plus fréquents [Carter, Rasmussen, 2007 ; VanWoert *et al.*, 2005] et favorisée par une épaisseur du substrat plus importante [Baraglioli *et al.*, 2008]. [VanWoert *et al.*, 2005] montrent que le substrat aurait l'effet le plus important dans la réduction du ruissellement même si la végétation apporte un plus par son influence sur l'évapotranspiration [Berghage *et al.*, 2007]. La saison joue également un rôle important [Baraglioli *et al.*, 2008; Mentens *et al.*, 2006; Stovin, 2009], le ruissellement serait moins important l'été du fait d'une évapotranspiration plus forte et donc d'une capacité de stockage plus importante pendant cette période.

Dans le cadre de ce travail, l'objectif est d'analyser le comportement hydrologique de toitures végétalisées afin d'identifier les caractéristiques qui favorisent l'abattement du ruissellement, de comprendre la variabilité saisonnière et enfin de développer un modèle qui permet de représenter le fonctionnement hydrologique de ces toitures à partir de paramètres et de données aisément accessibles.

Pour répondre à cet objectif, les flux d'eau d'une toiture végétalisée expérimentale ont été mesurés pendant deux ans. Cette toiture est composée de 6 différents compartiments ayant des compositions différentes. Ces compartiments et la mesure des flux d'eau sont présentés dans la première partie. Les résultats obtenus à partir de cette instrumentation sont présentés et analysés dans la deuxième partie puis une troisième partie présente FAVEUR-Modèle, le modèle développé sur la base de ces résultats.

1 Dispositif expérimental

La toiture végétalisée expérimentale est située à Trappes, à 30 km au Sud-Ouest de Paris. Le propos de ce banc d'essai est de comparer sur un même site (c-à-d mêmes conditions climatiques) différentes structures de végétalisation extensives, en faisant varier un seul paramètre entre chaque structure. Un toit (figure 1) a donc été divisé en six compartiments végétalisés de 35 m² (7x5 m) et deux compartiments de référence de 21 m² (7x3 m) dont un a été laissé avec seulement l'étanchéité (**BI**) et un autre avec des graviers (**GR**).



Figure 1: Toiture végétalisée expérimentale du CETE IF à Trappes avec les différents compartiments. Tout à droite se trouve la station météo, le pluviomètre est disposé entre les compartiments **SE3Y** et **SE3Z**. Les bacs verts au pied du bâtiment contiennent les augets (représentés sur la photo insérée en bas à droite) pour la mesure des débits de ruissellement.

Les six compartiments végétalisés ont donc des compositions différentes. La composition florale, l'épaisseur et la nature du substrat, et le type de couche de drainage ont été modifiés d'un compartiment à l'autre (figure 1 et tableau 1). La composition florale est soit un mélange de sédum (**S**) comprenant *S. album* (majoritaire), *S. sexangulare*, *S. reflexum*, *S. kamchatikum*, *S. spurium*, *S. acre* (faible quantité), soit un mélange de sédums et de graminées (**G**) comprenant *Festuca ovina*, *Festuca rubra*, *Dianthus carthusianorum*, *Poa pratensis*, *Koeleria glauca*. Un compartiment est également laissé sans végétation. Les épaisseurs de substrat choisies sont de **3** et **15** cm. Les substrats sont réalisés à partir de pouzzolane, tourbe et compost vert. La différence entre les substrats extensifs (**E**) et intensifs (**I**) [Lassalle, 2008] est la teneur massique en matière organique, 3,4 % pour les extensifs et 5,8 % pour l'intensif.

Tableau 1 : Nom et composition des différents compartiments

Code	SE3Y	SE3Z	NE3Y	SE15Y	GE15Y	GI15Y
Plantes	Sédum (S)		Non végétalisées (N)	Sédum (S)	Graminées + Sédum (G)	
Substrat			Extensif (E)			Intensif (I)
Hauteur de substrat	3 cm			15 cm		
Couche de drainage	Polystyrène expansé (Y)	Pouzzolane (Z)		Polystyrène expansé (Y)		

Un pluviomètre (surface de 1000 cm² avec une résolution de 0,1 mm), installé sur le toit, permet de mesurer les précipitations. Pour chaque compartiment, les débits de ruissellement sont mesurés avec des augets d'une résolution de 0,01 mm. Pour les toitures végétalisées, il est considéré que le ruissellement est l'eau s'écoulant dans la couche de drainage puis dans la gouttière après s'être infiltrée à travers le substrat. En ce qui concerne la toiture expérimentale présentée dans ce travail, il n'y a jamais de ruissellement à la surface de la végétation. Une station météo permet de mesurer la température et l'humidité relative de l'air à 2 m au-dessus de la végétation, la vitesse et la direction du vent à 3 m au-dessus de la végétation et le rayonnement net à 1 m au-dessus de la végétation. A partir de ces mesures, une évapotranspiration potentielle est calculée selon la formule de [Allen *et al.*, 1998]. L'ensemble des mesures présenté dans ce travail a été acquis en continu du 15 juin 2011 au 1 septembre 2013.

2 Résultats expérimentaux

2.1 Climatologie de la période

Le climat de Trappes est de type océanique dégradé. Sur la période du 15 juin 2011 au 1 septembre 2013, les maximums relevés sont de 38 °C (18 août 2012) pour la température et de 100 % pour l'humidité relative (plusieurs jours pendant l'hiver). Les minimums sont de -10 °C (13 février 2012) et de 15 % (09 septembre 2012). L'ampleur des variations saisonnières est similaire d'une année à l'autre. A partir du 1 octobre, une baisse marquée de la température et une augmentation de l'humidité de relative sont observées puis du 1 novembre jusqu'à fin janvier, les conditions météorologiques sont assez similaires pour l'hiver 2011-2012 : la température moyenne journalière est d'environ 9 °C avec une légère baisse fin décembre et une autre fin janvier et l'humidité relative généralement supérieure à 70 %. Pour l'hiver 2012-2013, les valeurs maximales sont proches de l'année précédente (autour de 10 °C) mais avec des périodes plus froides, plus fréquentes (début décembre 2012, janvier 2013 et fin février 2013). Les valeurs du rayonnement net sont très basses pendant cette période hivernale de novembre à janvier, conséquence de l'ensoleillement très faible de la région pendant l'hiver. Cette variation du rayonnement net se retrouve sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle puisque celle ci passe de 4,6 mm/jour, lors de son maximum en juin 2013 à des valeurs proches de zéro au minimum, l'hiver.

La moyenne, sur 30 ans, des précipitations montre une pluviométrie mensuelle assez régulière comprise, suivant les mois, entre 40 et 70 mm et un cumul annuel moyen d'environ 650 mm. La période observée sur ce site est assez différente. La pluviométrie est irrégulière, le mois le plus pluvieux est décembre 2011 avec 136,2 mm et le plus sec, février 2012 avec 7,4 mm. Les autres mois très pluvieux sont : août 2011 avec 87 mm de pluie, juin, octobre et décembre 2012 avec respectivement 132, 123 et 113 mm de pluie et juin 2013 avec 80 mm de pluie. Le cumul de pluie sur la période étudiée est de 1554 mm de pluie.

Dans l'objectif d'étudier les différences de comportement entre les six compartiments, les événements pluvieux ont été identifiés comme des périodes pluvieuses qui commencent au début de la pluie et se terminent lorsque les débits de ruissellement sont nuls pendant au moins une heure pour l'ensemble des compartiments. Puis, pour limiter les incertitudes, seuls les événements pluvieux dont le cumul de pluie est supérieur à 1 mm sont étudiés. Ainsi sur la période étudiée, 152 événements pluvieux supérieurs à 1 mm ont été observés, ce qui représente une hauteur cumulée de 1434 mm, soit 92 % de la pluie totale mesurée. La figure 2 présente l'occurrence de ces 152 événements. L'événement pluvieux le plus important a eu lieu du 11 au 26 décembre 2011 et la hauteur de pluie cumulée lors de cet événement est de 87 mm. La méthode d'identification des événements pluvieux explique la durée très longue de cet événement (15 jours). La succession d'averses au cours de cette période a favorisé la continuité des débits sur l'un ou l'autre des compartiments. La figure 2 fait également ressortir le fait que les événements pluvieux les plus importants (en cumul de pluie) et les plus longs ont principalement lieu pendant l'hiver, entre les mois d'octobre et de février. Il convient également de noter qu'aucun événement exceptionnel n'a été enregistré pendant cette période. Deux événements ont une période de retour supérieure à un an, et l'un des deux a une période de retour supérieure à deux ans.

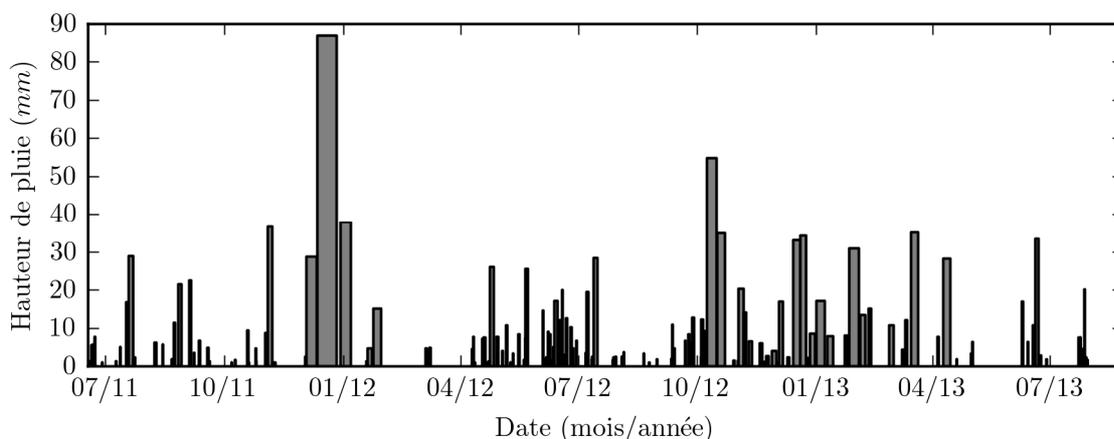


Figure 2 : Répartition temporelle des événements pluvieux ayant un cumul de pluie supérieur à 1 mm. La hauteur de la barre représente le cumul de l'événement et l'épaisseur de la barre, sa durée.

2.2 Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est utilisé comme critère pour évaluer la capacité des six compartiments à abattre le ruissellement. Sur la figure 3, ce critère est étudié pour l'ensemble de la période de mesure. Noté CR_{an} , il est défini, pour chaque compartiment comme le rapport entre le cumul de la hauteur d'eau ruisselée du compartiment pour tous les événements et le cumul de la pluie de tous les événements.

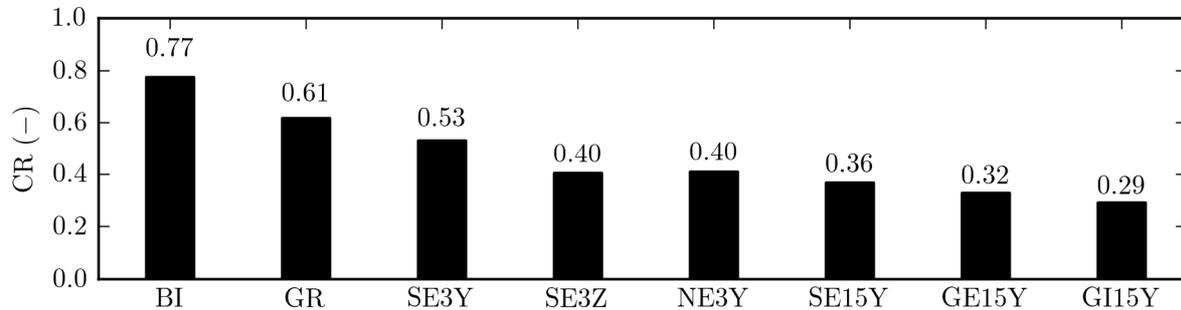


Figure 3 : Coefficients de ruissellement annuels pour chaque compartiment. Le chiffre en haut de chaque barre indique le coefficient de ruissellement annuel (CR_{an}).

Les résultats obtenus montrent donc que le compartiment **BI** est celui qui ruisselle le plus (77 %), ensuite c'est le compartiment avec les graviers (**GR**, 61 %). Le compartiment végétalisé qui produit le plus de ruissellement est **SE3Y** avec un CR_{an} de 53 % alors qu'un compartiment similaire mais avec une couche de drainage hydro-rétentrice permet de diminuer de plus de 10 % le ruissellement (**SE3Z**, 40 %). Le résultat obtenu avec la couche de drainage hydro-rétentrice est similaire à celui obtenu si la végétation est supprimée (**NE3Y**, 40 %). Si l'on augmente l'épaisseur jusqu'à 15 cm ; le ruissellement diminue encore (**SE15Y**, 36 %) et la capacité d'abattement est encore augmentée pour les compartiments dont la végétation est composée par le mélange graminées-sédums (**GE15Y**, 32% et **GI15Y**, 29%). La légère différence entre ces deux derniers compartiments peut être imputée à la nature différente du substrat.

Ces résultats sont légèrement différents si le coefficient de ruissellement est étudié à l'échelle temporelle de l'événement (CR_{ev} , rapport entre la hauteur d'eau ruisselée pendant un événement et le cumul de pluie de cet événement). Le tableau 2 présente pour chaque compartiment les caractéristiques des coefficients de ruissellement par événement : moyenne (CR_{ev} moyen), médiane (CR_{ev} médian), minimum (CR_{ev} min), maximum (CR_{ev} max).

Tableau 2: Caractéristiques des coefficients de ruissellement événementiels pour les 6 compartiments

Compartiment	CR_{ev} moyen (-)	CR_{ev} médian (-)	CR_{ev} max (-)	CR_{ev} min (-)
BI	0,68	0,73	1	0
GR	0,38	0,43	0,95	0
SE3Y	0,24	0,02	1	0
SE3Z	0,19	0	0,92	0
NE3Y	0,20	0,02	1	0
SE15Y	0,17	0	0,95	0
GE15Y	0,15	0	0,88	0
GI15Y	0,14	0	0,92	0

Pour le compartiment **BI**, les coefficients de ruissellement sont en moyenne assez forts ; cependant, même pour ce type de surface, le coefficient est très variable puisqu'il varie de 0 à 1 suivant les événements pluvieux. Seulement deux événements ne produisent pas de ruissellement, ensuite la plus faible valeur du coefficient de ruissellement est de 2 %

Comme pour le CR_{an} , le CR_{ev} est plus faible pour les autres compartiments. Pour **GR**, le coefficient de ruissellement moyen passe à 38 % et 23 % des événements n'ont pas produit de ruissellement. Pour les compartiments végétalisés, les coefficients de ruissellement calculés pour chaque événement sont, pour la moitié des événements, quasiment égaux à zéro. Les coefficients de ruissellement moyens sont donc faibles

mais les maximums sont forts puisque les coefficients de ruissellement maximums sont supérieurs à 88 % quelque soit le compartiment. Ces nombreux événements pour lesquels il n'y a pas de ruissellement expliquent le fait que les CR_{ev} moyen soient très nettement inférieurs au CR_{an} .

2.3 Discussion des résultats expérimentaux

Les coefficients de ruissellement annuels obtenus pour les deux toitures non-végétalisées peuvent sembler faibles par rapport à ce qu'il est possible de trouver dans la littérature. [Mentens *et al.*, 2006] indiquent des CR annuels de 91 % pour des toitures auto-protégées et d'environ 75 % pour des toitures avec des graviers, ce qui est proche des résultats obtenus par [VanWoert *et al.*, 2005] qui ont mesuré des CR de 73 % pour des toitures avec des graviers également. Les résultats obtenus avec la toiture expérimentale de Trappes peut trouver une explication dans la longueur de la période de mesure, 27 mois au lieu de 14 pour [VanWoert *et al.*, 2005] et dans la faible intensité des événements pluvieux (événements de période de retour inférieure à l'année) ce qui favorise les pertes au ruissellement.

Les résultats obtenus avec les compartiments végétalisées, en revanche, correspondent bien aux valeurs trouvées dans la littérature [cf. Ramier *et al.*, 2010] avec des coefficients de ruissellement annuels qui varient entre 53 et 29 %, soit un abattement annuel de la pluie de 47 à 71 %.

Comme cela avait été mis en évidence par [Baraglioli *et al.*, 2008], l'épaisseur du substrat augmente la capacité de rétention. La mise en place d'une couche de drainage hydro-rétentrice permet, selon nos observations d'augmenter l'abattement d'environ 10 % et plus surprenant contrairement aux observations de [VanWoert *et al.*, 2005], l'absence de végétation produit le même effet.

La modification du cortège floral a également une légère influence sur la capacité de rétention des toitures. Le mélange graminées-sédums a une capacité de transpiration plus importante et cette capacité est renforcée par un meilleur taux de couverture de la surface. Ainsi dans des conditions météorologiques similaires les toitures ayant cette végétation retrouveront plus rapidement une capacité de stockage supérieure.

Ces résultats obtenus sur deux années d'observations ne doivent pas masquer la forte variabilité des capacités d'abattement des toitures végétalisées. Cependant, bien que les coefficients de ruissellement peuvent varier entre zéro et un d'un événement pluvieux à l'autre rien (il est à noter que ceci est également observé pour les toitures non-végétalisées), pour la majorité des événements les coefficients de ruissellement sont très faibles (< à 2%).

L'observation des résultats met en évidence que le coefficient de ruissellement est fortement dépendant du cumul de pluie et de la durée de l'évènement. Plus un événement est important (en hauteur d'eau cumulée) et long et plus le ruissellement est important. Pour la série de mesures obtenue dans le cadre de ce travail, il est intéressant de noter que les événements les plus longs et les plus importants sont ceux qui ont eu lieu en hiver (figure 2). Une variabilité saisonnière est donc observée avec des coefficients de ruissellement plus importants l'hiver. Ceci est en accord avec les observations de [Baraglioli *et al.*, 2008; Mentens *et al.*, 2006; Stovin, 2009] et correspond au fait que l'évapotranspiration potentielle est bien plus faible pendant cette période.

3 Modélisation

3.1 FAVEUR-Modèle

L'objectif de produire un outil d'aide au choix de toitures végétalisées en fonction de critères hydrologiques (limitation de débits, capacité d'abattement) a motivé l'utilisation d'un modèle fonctionnel de toiture végétalisée. Ce modèle doit être :

- peu paramétré ;
- capable de simuler de longues chroniques de données afin de fournir des statistiques robustes ;
- utiliser un forçage simple : pluie et évapotranspiration potentielle fournies par Météo-France [Choisnel, 1988]

Le principe de fonctionnement du modèle est présenté à la figure 4. Ce modèle a été développé à partir des travaux de [Berthier *et al.*, 2011] mais l'adaptation à la base de données obtenue à partir du dispositif expérimental de Trappes et le respect des critères énoncés ci-dessus a nécessité des modifications.

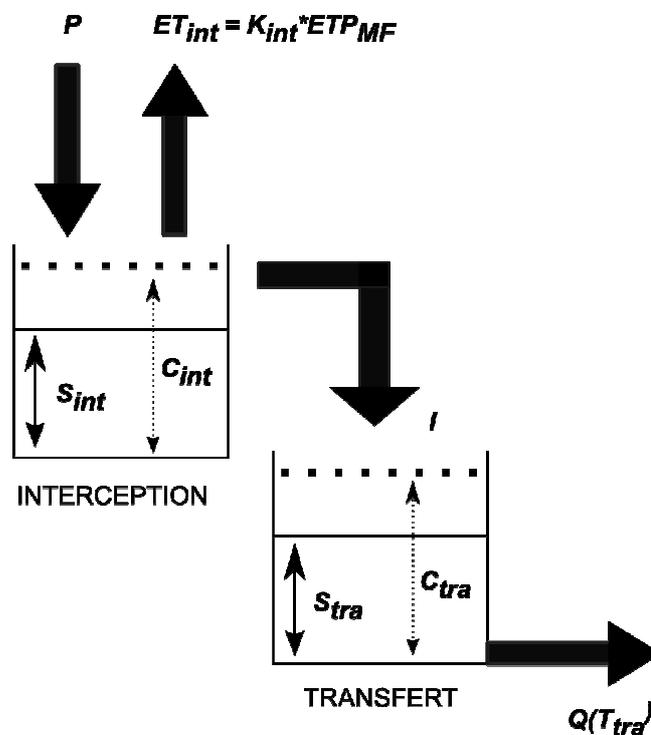


Figure 4 Schéma de principe du modèle FAVEUR (voir le texte pour la signification des paramètres)

Ainsi dans FAVEUR-Modèle (modèle Fonctionnel pour l'estimation de l'impact des toitures Végétalisées sur le ruissellement URbain), la toiture végétalisée est représentée par deux réservoirs : un réservoir d'interception et un réservoir de transfert. Les motivations de ce choix sont :

- réduire le nombre de paramètres et obtenir une paramétrisation qui puisse être reliée aux valeurs des caractéristiques fournies par les fournisseurs de toitures végétalisées ;
- coupler la modélisation des transferts verticaux (dans le substrat) et horizontaux (dans la couche de drainage) afin de simplifier la modélisation de chacun de ces flux. La représentation des phénomènes hydrauliques est souvent très paramétrée dans les modèles classiques. Il est proposé, ici de les modéliser sous la forme d'une fonction de transfert unique.

Le complexe de végétalisation a dans un premier temps une fonction d'abattement avec une capacité d'interception (C_{int}) qui sera vidée par évapotranspiration. Cette capacité d'interception représente donc la capacité d'interception et de stockage de la végétation et du substrat. Lorsque cette capacité d'interception est dépassée, l'excédent alimente alors le réservoir de transfert. Le transfert (dans le substrat et la couche de drainage) est alors représenté par le réservoir de transfert. Ainsi les deux réservoirs de FAVEUR-Modèle représentent les deux grandes fonctions attendues de la part des toitures végétalisées : l'abattement du ruissellement (interception) et l'atténuation des pics de ruissellement (transfert). C'est donc un modèle fonctionnel.

Le forçage du modèle est réalisé à partir de la pluie (P) et de l'évapotranspiration potentielle fournie par Météo-France (ETP_{MF}). Le calcul des différents stocks et flux d'eau est réalisé à chaque pas de temps de calcul t et est décrit ci-dessous.

Le réservoir d'interception est caractérisé par une capacité de stockage (C_{int}). La hauteur d'eau dans ce réservoir (S_{int}) évolue donc en fonction de la pluie et de l'évapotranspiration et du flux I . L'évapotranspiration de ce réservoir (ET_{int}) est estimée à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP_{MF}). Les valeurs de ETP_{MF} n'étant pas adaptées aux toitures végétalisées [Choisnel, 1988], un coefficient de modulation (K_{int}) permet d'ajuster ces valeurs. Enfin, l'évapotranspiration n'est possible que si le stock d'eau est suffisant (c-à-d $S_{int} > ET_{int}$). D'où :

$$ET_{int}(t) = \min(S_{int}(t-1), K_{int} * ETP_{MF}(t))$$

Ensuite le transfert d'eau I du réservoir d'interception vers le réservoir de transfert est calculé. Il correspond au surplus d'eau par rapport à la capacité C_{int} , ainsi :

$$I(t) = \max(S_{int}(t-1) + P(t) - ET_{int}(t) - C_{int}, 0)$$

Puis, le stockage d'eau dans le réservoir de transfert est actualisé :

$$S_{tra}(t) = S_{tra}(t-1) + I(t) - Q(T_{tra})$$

Il est ensuite possible de calculer le stock d'eau dans le réservoir de transfert. Ce stock d'eau est calculé en deux temps, dans un premier temps (noté $t/2$) il est actualisé à partir du flux I et du stock au temps précédent $S_{tra}(t-1)$:

$$S_{tra}(t/2) = S_{tra}(t-1) + I(t)$$

Puis, le ruissellement est calculé à partir de ce nouveau stock :

$$Q(t) = \min\left(S_{tra}, \frac{dt}{T_{tra}} * \left(\frac{S_{tra}(t/2)}{C_{tra}}\right) * S_{tra}(t/2)\right)$$

Où dt représente la valeur du pas de temps de calcul. Enfin le stock dans le réservoir de transfert est mis à jour :

$$S_{tra}(t) = S_{tra}(t/2) + Q(t)$$

Pour résumer FAVEUR-Modèle calcule à partir de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle, les hauteurs d'eau dans les réservoirs d'interception et de transfert (S_{int} et S_{tra}), le flux d'eau entre les réservoirs d'interception et de transfert (I) et la quantité d'eau ruisselée (Q). Ce modèle a besoin de quatre paramètres pour fonctionner C_{int} , K_{int} , C_{tra} , T_{tra} , qui ont été déterminés lors du calage.

3.2 Sensibilité et calage de FAVEUR-Modèle

FAVEUR a été utilisé pour simuler le comportement hydrologique des 6 compartiments végétalisés (**SE3Y**, **SE3Z**, **NE3Y**, **SE15Y**, **GE15Y**, **GI15Y**) pour la période du 15 juin 2011 au 14 juillet 2012. Le pas de temps de calcul (dt) est de 3 min. Le calage du modèle est basé sur une méthode multicritères et multiobjectives [Gupta *et al.*, 1999] qui consiste à faire varier simultanément les 4 paramètres à caler. La plage de variation de ces paramètres est définie à partir de valeurs réalistes comprises entre un maximum et un minimum. Une série de 1000 simulations a ainsi été réalisée pour chacun des 6 compartiments. La qualité des simulations est déterminée en fonction de deux critères, le critère de Nash et Sutcliffe (C_{nash} , Nash, Sutcliffe, 1970) et un critère de bilan (C_{bilan}), définis ci-dessous :

$$C_{nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{mod,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{et} \quad C_{bilan} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{mod,i} - \sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \times 100$$

où Q_{obs} est le ruissellement observé, Q_{mod} est le ruissellement simulé par FAVEUR-Modèle, $\overline{Q_{obs}}$ est la moyenne du ruissellement observé.

Les résultats de l'ensemble de ces simulations sont ensuite classés selon un rangement de Pareto [Yapo *et al.*, 1998] afin de faire ressortir les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible et les valeurs des paramètres qui donnent les meilleurs résultats.

Les résultats montrent que le modèle est plus sensible aux paramètres du réservoir d'interception que du réservoir de transfert et il fut également nécessaire de faire varier le K_{int} suivant la saison. Les valeurs des 4 paramètres qui donnent les meilleures simulations sont données dans le tableau 3 :

Tableau 3: Valeurs des paramètres de chaque réservoir de FAVEUR-Modèle

Paramètres	SE3Y	SE3Z	NE3Y	SE15Y	GE15Y	GI15Y
K_{int} (mm) [été/hiver]	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1/0,5	1,2/0,5	1,2/0,5
C_{int} (mm)	12	12	12	21	21	21
C_{tra} (mm)	10	20	10	30	30	32
T_{tra} (min)	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Les résultats des simulations obtenus à partir de ces paramètres sont représentés par la figure 5.

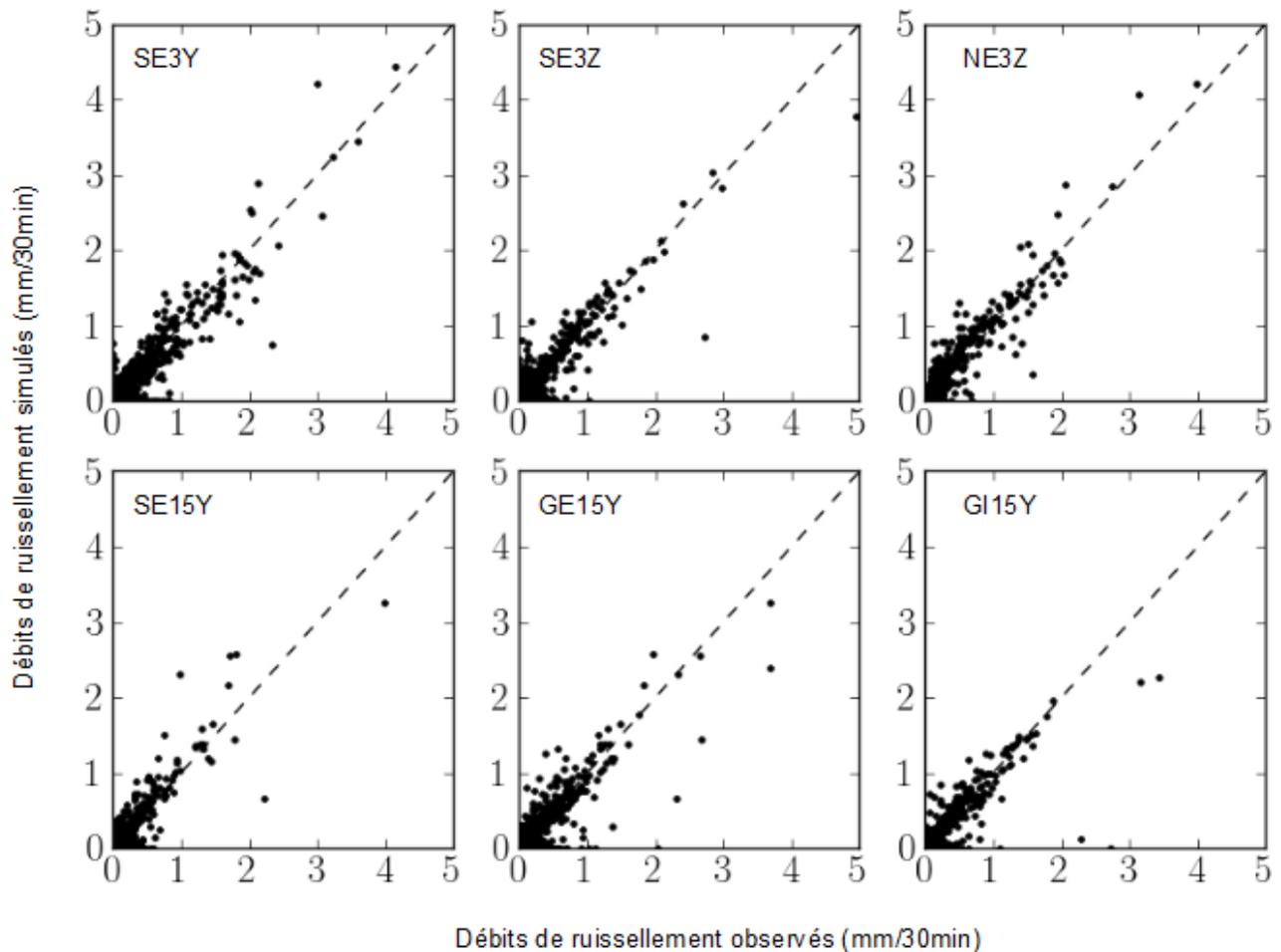


Figure 5 : Comparaison entre les débits de ruissellement observés et simulés au pas de temps de 30 min pour la période du 15 juin 2011 au 14 juillet 2012.

Les résultats obtenus sont donc globalement satisfaisants pour la période de simulation. Les critères de Nash (dont le maximum est de 1) varient de 0,78 pour **SE15Y**, 0,79 pour **GE15Y** et **GI15Y** à 0,86 pour **SE3Z** et 0,89 pour **SE3Y** et **NE3Z**. Les critères de bilan sont légèrement moins bons : alors qu'ils devraient être proches de 0, ils sont de -1 % et -4 % pour **SE3Y** et **GE15Y**, de 10 et 12 % pour **SE3Z** et **NE3Z** et de -11 et -13 % pour **SE15Y** et **GI15Y**. Il est également à noter que les débits extrêmes, les plus faibles et les forts, sont les moins bien représentés.

3.3 Discussion à propos de FAVEUR-Modèle

Les travaux récents de modélisation des toitures végétalisées ont pour objectif de d'estimer le ruissellement issu de toitures végétalisées soit à partir de paramètres physiques avec des modèles mécanistes [Hilten et al., 2008; Palla et al., 2009; Sun et al., 2013] ou encore à partir de données hydrométéorologiques (pluie, intensité, période de temps sec...) sur la base de régressions linéaires multiples [Stovin et al., 2012]. Ces modèles sont difficilement paramétrables pour être utilisés simplement pour différentes toitures végétalisées et avec de longues chroniques temporelles de pluie. Le choix du schéma numérique de FAVEUR-Modèle a permis d'obtenir très peu de paramètres à caler et les valeurs de ces paramètres sont cohérentes suivant les différents compartiments pour lesquels elles sont obtenues. Ainsi, le rôle de la végétation se retrouve principalement dans le paramètre K_{int} . Celui-ci est donc logiquement identique pour les compartiments composés de sédums et pour les deux compartiments, sur lesquels, le mélange graminées-sédums est présent. En revanche, il est plus surprenant d'obtenir des coefficients égaux ou supérieurs à 1. Cela traduit un effet de compensation possible entre K_{int} et C_{int} pour le critère de Nash et entre l'été et l'hiver pour le critère de bilan. La capacité de stockage du réservoir d'interception doit être fortement dépendante de l'épaisseur du substrat. Or nous retrouvons bien les mêmes valeurs de C_{int} pour les substrats de même épaisseur, 12 mm pour 3 cm de substrat et 21 mm pour 15 cm de substrat. Un autre objectif du développement de ce modèle était de pouvoir relier les paramètres à des données éventuellement fournies

par les fabricants. En ce qui concerne la capacité de stockage d'eau, une donnée disponible est la capacité maximale en eau (**CME**, ADIVET *et al.*, 2007). Ainsi la CME fournie pour les substrats des compartiments est de 45 % en volume pour les substrats extensifs et 40,3 % en volume pour le substrat intensif. Il est donc intéressant de remarquer qu'il a été possible d'obtenir des C_{int} pour les substrats de 3 cm, correspondant au produit de l'épaisseur du substrat par la **CME**. Pour les substrats de 15 cm, la valeur de C_{int} obtenue correspond à une hauteur de 5 cm. Cependant la CME est donnée quelle que soit l'épaisseur du substrat mise en œuvre. Des questions restent donc à éclaircir sur la capacité de ce type de substrat à stocker de l'eau dans toute son épaisseur.

La capacité de stockage du réservoir de transfert représente quant à elle le transfert d'eau à travers le substrat et dans la couche de drainage, elle est donc logiquement la même pour **SE3Y** et **NE3Y** qui ont les mêmes caractéristiques mais augmente légèrement pour **SE3Z** du fait des propriétés hydro-rétentrices de la couche de drainage en pouzzolane. Pour les substrats de 15 cm, cette valeur augmente légèrement pour **GI15Y**, ce qui traduit la différence de nature de substrat et permet d'obtenir les ruissellements un peu moins importants observés pour ce compartiment. Enfin le critère T_{tra} est à rapprocher d'un temps de transfert principalement lié à la géométrie de la couche de drainage. Les 6 compartiments étant identiques, ce paramètre est donc le même. Ces deux derniers paramètres jouent uniquement sur les débits de ruissellement et pas sur la production de ruissellement. Ils peuvent éventuellement se compenser et pour relier les valeurs obtenues ici à des caractéristiques des toitures végétalisées (p. ex. épaisseur du substrat, type de la couche de drainage, géométrie de la toiture), il est nécessaire d'utiliser FAVEUR-Modèle avec d'autres toitures végétalisées.

Conclusion et perspectives

La mesure de flux hydrique sur la toiture végétalisée expérimentale de Trappes a permis de confirmer la capacité des toitures végétalisées à diminuer le ruissellement par rapport à des toitures traditionnelles. L'abattement qu'il est possible d'obtenir varie de 47 à 71 % suivant le type de toiture végétalisée. L'épaisseur du substrat semble être la caractéristique la plus importante dans l'augmentation de l'abattement puis et dans une moindre mesure c'est le type de la végétation et le pourcentage de matière organique du substrat. Toutefois, à épaisseur de substrat équivalente, il est possible d'augmenter la capacité de rétention par l'utilisation d'une couche de drainage hydro-rétentrice. Contrairement à d'autres observations, la végétation a pour effet dans cette étude d'augmenter le ruissellement. Ce résultat reste à être confirmé et expliqué. Sur la base de ces observations, un modèle fonctionnel, FAVEUR-Modèle, a été développé. Ce modèle est composé de deux réservoirs, les données d'entrée sont la pluie et l'évapotranspiration potentielle qui peut être fournie par Météo-France et il utilise quatre paramètres. Une phase de calage a permis de confirmer la cohérence entre les valeurs de ces paramètres et les caractéristiques des toitures végétalisées. Une simulation sur un an de données a montré la capacité du modèle à reproduire correctement les débits de ruissellement et dans une moindre mesure le cumul de ruissellement sur l'ensemble de la période. Il est maintenant nécessaire de confirmer ces résultats lors d'une étape de validation et par la simulation d'autres toitures végétalisées. Une étape importante sera alors de relier les quatre paramètres à des caractéristiques aisément mesurables pour les toitures végétalisées. Cependant sur la base de la version de FAVEUR-Modèle existante, un outil d'aide aux choix de toitures végétalisées, FAVEUR-Outils, a commencé à être mis en œuvre [Berthier *et al.*, 2013].

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche TVGEP (conception de Toitures Végétalisées pour la Gestion des Eaux Pluviales) financé par le programme C2D2 (Concevoir et Construire pour le Développement Durable). Les auteurs remercient les membres de l'ADIVET et ainsi que les représentants des Conseil Généraux des Hauts-de-Seine et de Seine-St-Denis pour leur participation à la mise en place de la toiture végétalisée ainsi que pour l'intérêt porté à ce travail.

Références

- ADIVET, FFB, CSFE (2007). Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées (édition n°2).
- Allen R.G., Peireira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

- Baraglioli A., Guillon A., Kovacs Y., Senechal C. (2008). Studies on the quantity impacts of green roofs, in: 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland.
- Berthier E., Ramier D., De Gouvello B. (2011). Simulation of green roof hydrological behavior with a reservoir model, in: 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brésil, 11-16 septembre 2011, p. PAP005348.
- Berthier E., Ramier D., Versini P.-A., Pinta P., Safitri L., de Gouvello B. (2013). FAVEUR²: a functional model to assess hydrological performances of vegetative green roofs, in: World Green Infrastructures Congress, Nantes, France, 9-13 septembre 2013.
- Carter T.L., Rasmussen T.C. (2007). Hydrologic behavior of vegetated roofs. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 42, 1261 – 1274.
- Choisnel E. (1988). Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques. *La Météorologie* 7ème série.
- Gupta H.V., Bastidas L.A., Sorooshian S., Shuttleworth W.J., Yang Z.L. (1999). Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods. *J. Geophys. Res.* 104, 19491–19503.
- Hilten R.N., Lawrence T.M., Tollner E.W. (2008). Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *J. Hydrol.* 358, 288–293.
- Lassalle F. (2008) Végétalisation extensive des terrasses et toitures. *Le Moniteur.* 243p
- Mentens J., Raes D., Hermy M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landsch. Urban Plan.* 77, 217–226.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I -- A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290.
- Palla A., Gnecco I., Lanza L.G. (2009). Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *J. Hydrol.* 379, 193–204.
- Ramier D., Berthier E. (2010). Bibliographie et plan d'expérience sur le comportement hydrique des toitures végétalisées. Livrable du projet TVGEP. 16p.
- Stovin V. (2009). The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water Environ. J.* 24(3), 192-199.
- Stovin V., Vesuviano G., Kasmin H., (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *J. Hydrol.* 414–415, 148–161.
- Sun T., Bou-Zeid E., Wang Z.-H., Zerba E., Ni G.-H. (2013). Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport. *Build. Environ.* 60, 211–224.
- VanWoert N.D., Rowe D.B., Andresen J.A., Rugh C.L., Fernandez R.T., Xiao L., (2005). Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth. *J. Env. Qual* 34, 1036–1044.
- Yapo P.O., Gupta H.V., Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *J. Hydrol.* 204, 83–97.