HAL open science

# Bilan hydrique des toitures végétalisées : vers de meilleures compréhension et modélisation

E. Berthier, B. de Gouvello, F. Archambault, D. Gallis

## To cite this version:

E. Berthier, B. de Gouvello, F. Archambault, D. Gallis. Bilan hydrique des toitures végétalisées : vers de meilleures compréhension et modélisation. Novatech 2010 - 7ème Conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie / 7th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management, Jun 2010, Lyon, France. pp.1-10. hal-03296693

**HAL Id: hal-03296693**

**https://hal.science/hal-03296693v1**

Submitted on 22 Jul 2021

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

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

# Bilan hydrique des toitures végétalisées: vers de meilleures compréhension et modélisation

## Water balance of green roofs: contributions to better understanding and simulation

Emmanuel Berthier[1], Bernard de Gouvello[2], Florian Archambault[1], Didier Gallis[1]

1 : LROP (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'Ouest Parisien), DREIF, 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes ; mél : emmanuel.berthier@developpement-durable.gouv.fr
2 : Université Paris-Est, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et LEESU (Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains) 6-8 avenue Blaise Pascal, 77455 Champs-sur-Marne cedex 2 ;
mél: bernard.degouvello@cereve.enpc.fr

## RÉSUMÉ

La technique de la Toiture Terrasse Végétalisée (TTV) est de plus en plus utilisée, en particulier pour une meilleure gestion des eaux pluviales à la parcelle. Le bilan hydrique des TTV reste partiellement méconnu, principalement du fait d'un manque d'informations sur l'importance du stockage d'eau et du flux d'évapotranspiration. Le travail présenté ici, qui s'apparente à une étude préliminaire, poursuit un double objectif : i) évaluer l'intérêt d'un suivi expérimental détaillé du bilan, c'est à dire non limité à la transformation pluie-ruissellement, et ii) développer une modélisation conceptuelle de type réservoir. Deux bases de données sont utilisées : celle du CSTB portant sur une toiture (146m$^2$) et un panneau (1m$^2$), de longue durée (1an) mais limitée à l'observation de la pluie et du ruissellement, et celle du LROP portant sur un échantillon de ½m$^2$, de durée courte (9jours) mais détaillée avec l'observation de l'évapotranspiration et du stockage d'eau. L'intérêt d'un suivi détaillé apparaît clairement si l'on compare les analyses effectuées sur les 2 bases de données: la connaissance des différents flux et stockages sur l'échantillon du LROP permet une compréhension beaucoup plus poussée de la répartition du bilan hydrique et le modèle développé associé est plus juste et robuste. Le type de modélisation testé (conceptuel à réservoir) est apparu pertinent pour reproduire les bilans observés et à terme les extrapoler à d'autres conditions (autres structures et autres climats).

## MOTS CLÉS

Toiture végétalisée, bilan hydrique, modélisation

## ABSTRACT

Vegetated or Green Roof (TTV) is a technique which is becoming increasingly used for sustainable rainwater management, particularly at the allotment scale. The hydrological budget of TTVs remains poorly understood, mainly due to a lack of information on the importance of water storage and evapotranspiration fluxes. The work presented herein can be considered as a preliminary study and has a double objective: i) assess the value of detailed monitoring, i.e. not limited to the rainfall-runoff transformation, and ii) develop a conceptual reservoir storage model. Two databases are used: that of the CSTB on a roof (146m$^2$) and a sample (1m$^2$), of long-duration (1 year), but limited to observation of rain and runoff, and that of LROP on a sample ½ m$^2$, of short duration (9 days) but with detailed observation of evapotranspiration and water storage. The advantage of detailed monitoring is clear if we compare the analysis performed on the two databases: knowledge of different fluxes and storages on the sample of LROP allows a better understanding of the water balance and the model developed is *a priori* more accurate and robust. The type of model tested (reservoir storage model) appears suitable to reproduce the TTV water balance and eventually to extrapolate the model to other conditions (other structures and other climates).

## KEYWORDS

Green roof, hydrological budget, simulation

# INTRODUCTION

Végétaliser les toitures offre a priori des effets bénéfiques (Lassalle, 2008) au niveau du bâtiment (amélioration des isolations thermique et acoustique et de la durabilité de l'étanchéité) et à l'échelle de la ville (amélioration de la qualité de l'air, de l'esthétique paysager, réduction de l'îlot de chaleur urbain, accroissement de la biodiversité urbaine). La technique contribue aussi à la démarche de gestion à la source des eaux pluviales peu polluées, en contribuant à leur faire se rapprocher du cycle naturel (stockage et évapotranspiration).

La végétalisation des toitures connaît depuis quelques années un fort développement en France, elle est très répandue dans certains autres pays, en particulier en Allemagne le leader mondial. La technique la plus utilisée est la Toiture Terrasse Végétalisée extensive (TTV) qui est moins exigeante en entretien et qui s'adapte aussi bien aux projets neufs qu'aux projets de réhabilitation en raison de sa faible surcharge pondérale.

Afin de bien concevoir et dimensionner les TTV pour la gestion des eaux pluviales, des études et recherches ont été menées sur leur comportement hydrique. Ces études sont centrées sur la quantité d'eau ruisselée à l'exutoire de toitures expérimentales (Mentens et al., 2006 pour une synthèse ; pour des études récentes, Palla et al., 2008a ; Uhl and Schiedt, 2008). Elles montrent qu'une TTV a un double effet: i) réduction du ruissellement par évapotranspiration (effet d'abattement de la pluie) et ii) régulation du ruissellement, avec atténuation et retard de son débit de pointe associé (effet de rétention de la structure). Toutes les TTV suivies ont un comportement saisonnier marqué, avec une efficacité de réduction et de régulation du ruissellement bien plus importante au printemps et en été. Seulement quelques études récentes font appel à la modélisation (Baraglioli et al., 2008 ; Palla et al., 2008b) mais elles n'ont pas débouchés encore sur un outil robuste permettant l'extrapolation des résultats à d'autres toitures et sous d'autres climats.

Notre travail a pour objectif d'améliorer la connaissance du comportement hydrique des TTV, afin de mieux concevoir et dimensionner les toitures, mais aussi de mieux évaluer l'impact de la technique sur la gestion des eaux pluviales à l'échelle de la ville. L'étude présentée ici est en quelque sorte préliminaire: elle consiste à évaluer l'intérêt d'un suivi expérimental détaillé, c'est à dire ne se limitant pas à la simple mesure de la transformation pluie-ruissellement, et d'une démarche de modélisation couplée. Dans la 1$^{ère}$ partie du travail, la pertinence de la modélisation est testée sur une base de données existante consistant en l'observation pendant 1an de la pluie et du ruissellement sur une toiture de taille réelle et un panneau équivalent de taille réduite. Dans une 2$^{nd}$ partie, un lysimètre par pesée est développé pour mesurer complètement le bilan hydrique d'échantillons de TTV, un modèle dédié à la simulation de ces échantillons est ensuite testé.

# 1 OBSERVATION ET MODELISATION SUR UNE TOITURE EXISTANTE ET UN PANNEAU EQUIVALENT

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment français (CSTB) a instrumenté en 2003 une toiture végétalisée existante ainsi que des panneaux de toiture de tailles réduites recouverts de différents matériaux. L'objectif de notre travail est de se servir de cette base de données pour commencer à élaborer une modélisation pertinente du bilan hydrique des TTV.

## 1.1 Rappel sur les données expérimentales disponibles

Le dispositif et les données disponibles ont déjà été décrits dans les articles de De Gouvello et Berthineau (2005) et De Gouvello (2007). Le dispositif réalisé comprend 4 panneaux de toiture d'1m² couverts avec différents matériaux (Figure 1): 1. des tuiles romanes incliné à 26°correspondant à une maison individuelle, 2. un bac acier incliné de 6° correspondant à un local industriel, 3. une TTV extensive constituée d'une végétation de type sédum et d'une unique couche de substrat d'épaisseur 100mm, et 4. des gravillons sur isolant correspondant à une toiture terrasse classique (4cm de granulat 5-22mm). Une toiture végétalisée grandeur nature de 146 m² voisine des panneaux a aussi été instrumentée, elle est constituée d'une structure mono-couche équivalente au panneau de 1m². Les mesures effectuées comprennent la pluie par l'intermédiaire d'un pluviomètre (précision 0,2mm) et les ruissellements évacués par les différents échantillons (augets basculeurs de précisions 0,1mm pour les panneaux et 0,02mm pour la toiture). Les données utilisées pour notre étude couvrent une année (du 20 Mars 2004 au 17 Mars 2005) au pas de temps de 3min, avec des données non satisfaisantes pendant 6 périodes représentant un cumul de 40jours. Les données d'évapotranspiration potentielles journalières fournies par Météo-France (Choisnel, 1988) ont été

acquises et transformées au pas de temps de 3min en introduisant le cycle diurne. Le cumul de pluie sur cette année d'observation est de 566mm, inférieur à la moyenne de 650mm.

Les bilans pluie-ruissellement ont été réalisés à l'échelle de l'année (Tableau I): alors que les pertes sont réduites sur les panneaux de tuiles et d'acier (résultats attendus), le panneau de simples gravillons retient plus de 30% de la pluie annuelle alors que celui végétalisé en retient plus de 65%, ce qui illustre l'intérêt de la végétalisation. La toiture entière élimine, elle, 55% de la pluie. Toutes les surfaces, y compris les panneaux en tuiles et acier, ont des comportements saisonniers marqués (non montré) avec des ruissellements proportionnellement plus important en hiver qu'en été. Il était attendu une différence de comportement de la TTV entre 1m$^2$ et 146m$^2$, lié à des effets d'échelle mais pas dans le sens observé : le temps de transfert importants dans la toiture entière devait à priori favoriser les pertes par stockage et évapotranspiration. La Figure 2 permet de comparer sur les 2 surfaces les coefficients de ruissellement (rapport ruissellement/pluie) et les abattements (pluie–ruissellement) observés lors de 74 événements pluvieux identifiés pendant l'année de mesure. Les comportements des 2 surfaces sont plutôt cohérents, ce qui rassure sur la pertinence d'une étude à échelle réduite. L'étude des panneaux conduit à des résultats plus favorables (ruissellement réduit): cela pourrait s'expliquer par un séchage plus rapide du panneau de 1m$^2$ causé par la réverbération du soleil sur son encadrement (qui déborde d'une quinzaine de cm au dessus de la surface, cf. Figure 1).

Figure 1 : Photos des panneaux et de la toiture suivis sur le site du CSTB

| Type de toiture | Coefficient de ruissellement |
|---|---|
| panneau de tuiles (1 m²) | 88,6% |
| panneau acier (1 m²) | 93,6% |
| panneau de gravillons (1 m²) | 57,6% |
| **panneau végétalisé (1 m²)** | **34,8%** |
| **toiture végétalisée (146 m²)** | **45,3%** |

Tableau I : Coefficient de ruissellement annuel observé sur les panneaux et la toiture du CSTB

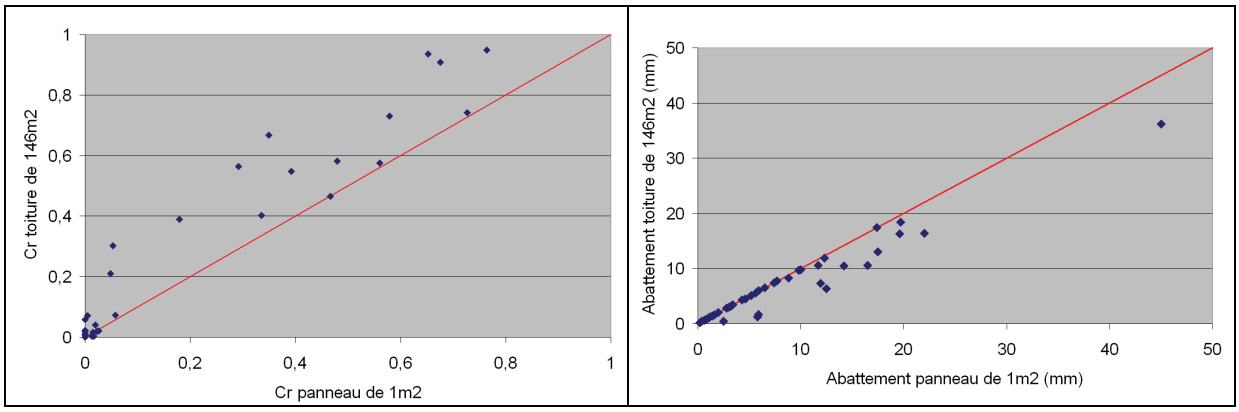


Figure 2 : Comparaison des coefficients de ruissellement (-) et des abattements de pluie (en mm) du panneau et de la toiture végétalisés du CSTB, observés lors de 74 événements pluvieux

## 1.2 Modélisation conceptuelle du bilan hydrique du panneau

Dans ce paragraphe, les données acquises sur le panneau sont l'objet d'une modélisation. Le panneau a été retenu car les transferts latéraux peuvent y être négligés, ce qui n'est pas le cas de la toiture entière, et donc la modélisation peut représenter uniquement des flux verticaux (même si nous avons conscience que le panneau a pour certains événements un comportement différent de celui de la toiture).

### *1.2.1 Élaboration de la structure du modèle*

Le modèle élaboré est un modèle conceptuel de type « réservoirs ». Il s'inspire du schéma d'échanges sol-atmosphère ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère développé par Météo-France ; Noilhan et Planton, 1989) tout en étant adapté au contexte des TTV. Le panneau étudié est considéré constitué de 2 couches verticales (la végétation et le substrat) modélisées comme des réservoirs qui stockent de l'eau et en échangent à leurs limites (avec l'atmosphère, entre eux et au fond). Les flux échangés sont calculés à chaque pas de temps i en fonction des stocks S au pas de temps i-1 (cf. Figure 3 et Tableau II pour la signification des variables et paramètres):

<u>Calcul des flux au pas de temps i, en fonction des stocks d'eau au pas de temps (i-1) :</u>

si $P(i)=0$ si $S_{veg}(i-1)>0$, $E_{veg}(i)=\min[S_{veg}(i-1),ETP(i)]$ ; $E_{sub}(i)=0$ ;

sinon $E_{veg}(i)=0$ ; $E_{sub}(i)=\min[ETP(i),S_{sub}(i-1)-C_{sub_wilt}].LAIveg/LAI$ ;

si $P(i)>0$ $E_{veg}(i)=E_{sub}(i)=0$ ;

$I_{sub}(i)=\max[P(i)-(C_{veg}-S_{veg}(i-1)),0]$ ;

$R(i)=\max[K_{sub}/(d_{sub}.\Delta t).(S_{sub}(i-1)-C_{sub_fc}),0]$

<u>Calcul des nouveaux stocks d'eau au pas de temps i :</u>

$S_{veg}(i)=S_{veg}(i-1)+P(i)-E_{veg}(i)-I_{sub}(i)$ ;

$S_{sub}(i)=S_{sub}(i-1)+I_{sub}(i)-E_{sub}(i)-R(i)$ ;

Il est supposé qu'en période pluvieuse (P>0), l'évapotranspiration est nulle (E=0). Il est important de retenir 2 paramètres clés du comportement hydrique du substrat: i) si sa teneur en eau est inférieure à la « capacité au champ » $C_{sub_fc}$, alors il n'y a pas de ruissellement gravitationnel vers le fond de la TTV, et ii) le séchage du substrat par évapotranspiration a lieu tant que sa teneur en eau reste supérieure au point de flétrissement de la végétation $C_{sub_wilt}$.

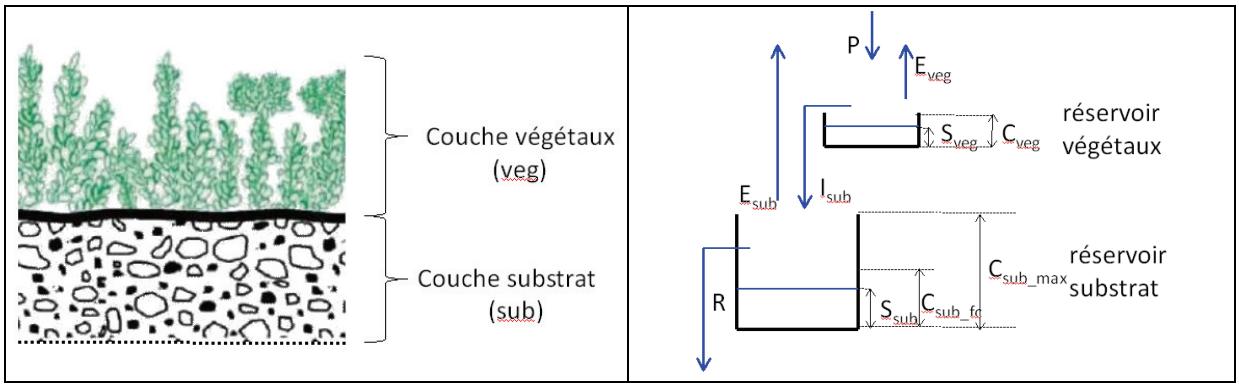


Figure 3 : Schéma vertical du panneau mono-couche du CSTB et schéma du modèle dédié

| Nom | Unité | Désignation | Valeurs[1] |
|---|---|---|---|
| *Variables d'entrées* | | | |
| P | mm | pluie observée | |
| ETP | mm | évapotranspiration potentielle fournie par Météo-France | |
| *Couche de végétation* | | | |
| $S_{veg}$ | mm | stockage dans la végétation | |
| $C_{veg}$ | mm | stockage maximum de la végétation | 0,2 |
| $LAI_{veg}$ | - | indice foliaire de la végétation | 3 |
| $E_{veg}$ | mm | évaporation de la végétation | |
| *Couche de substrat* | | | |
| $d_{sub}$ | mm | épaisseur du substrat | 100 ; 60 |
| $I_{sub}$ | mm | infiltration de la végétation dans le substrat | |
| $S_{sub}$ | mm | stockage dans le substrat | |
| $C_{sub_max}$ | mm | stockage maximum dans le substrat | 30 ; 20 |
| $C_{sub_fc}$ | mm | capacité au champ du substrat | 23 ; 16 |
| $C_{sub_wilt}$ | mm | point de flétrissement dans le substrat | 2 |
| $K_{sub}$ | mm.s | dynamique du drainage gravitationnel du substrat | 12 ; 7,5 |
| $E_{sub}$ | mm | évapotranspiration du substrat | |
| *Variables de sortie* | | | |
| R | mm | ruissellement à la base de la TTV | |
| *Couche d'alvéoles (uniquement pour la modélisation de l'expérience du LROP)* | | | |
| $A_{alv}$ | % | part du fond de la TTV couverte par les alvéoles | 30 |
| $S_{alv}$ | mm | stockage dans les alvéoles | |
| $C_{alv}$ | mm | stockage maximum dans les alvéoles | 6 |
| $I_{alv}$ | mm | infiltration depuis le substrat dans les alvéoles | |
| $E_{totale}$ | mm | évapotranspiration des alvéoles et du substrat | |
| $E_{alv}$ | mm | évapotranspiration des alvéoles | |

1 : si deux valeurs sont mentionnées, la 1ère est pour le panneau du CSTB, la 2nd pour l'expérience du LROP

Tableau II: paramètres et variables utilisées dans les modélisations

### *1.2.2 Résultats et analyses*

Le modèle est appliqué en continu sur toute l'année d'observation au pas de temps de 15s (ce pas de temps fin permet une discrétisation temporelle simplifiée dans le modèle). Les données simulées sont ensuite exprimées à différents pas de temps afin de les analyser. Les paramètres ont été calés sur 2 périodes pluvieuses distinctes (mois d'Août et d'Octobre ; non montré).

En bilan, le modèle est plutôt bon, avec un cumul de ruissellement simulé de 186mm, contre 192mm observé. La Figure 4 montre le nuage de points entre les ruissellements observés et simulés, au pas de temps de 3min et 1h. A 3min, la dispersion est assez importante (en partie due au caractère discret des observations par auget de 0,1mm), avec une surestimation de la part du modèle des faibles ruissellements et une sous-estimation des forts. Le nuage de point est plus satisfaisant au pas de temps horaire, même si la tendance de sur-estimation des faibles ruissellements reste visible. Le modèle n'arrive pas aussi à reproduire certains ruissellements dans le cas où le substrat reste assez sec ($S_{sub} < C_{sub_fc}$ ; non montré).

Il est intéressant d'examiner les variations du stockage d'eau dans le substrat ($S_{sub}$) et de la capacité de stockage disponible dans la TTV (estimée comme la différence entre la capacité maximale $C_{sub_max}$ et $S_{sub}$) (Figure 5). En période estivale, le stock dans le substrat reste régulièrement au niveau du point de flétrissement (2mm). La distribution de la capacité de stockage disponible montre que pour 30% du temps de la simulation, plus de 25mm sont disponibles (très intéressant pour la gestion des eaux pluviales), mais par contre pour 25% du temps, le stockage disponible est inférieur à 10mm. Ce constat illustre la grande variabilité de disponibilité d'une TTV et donc la nécessité de bien la comprendre et la reproduire afin de correctement dimensionner sa structure et de mieux évaluer les conséquences pour la gestion des débits de pointe et les besoins des bassins de rétention en aval.

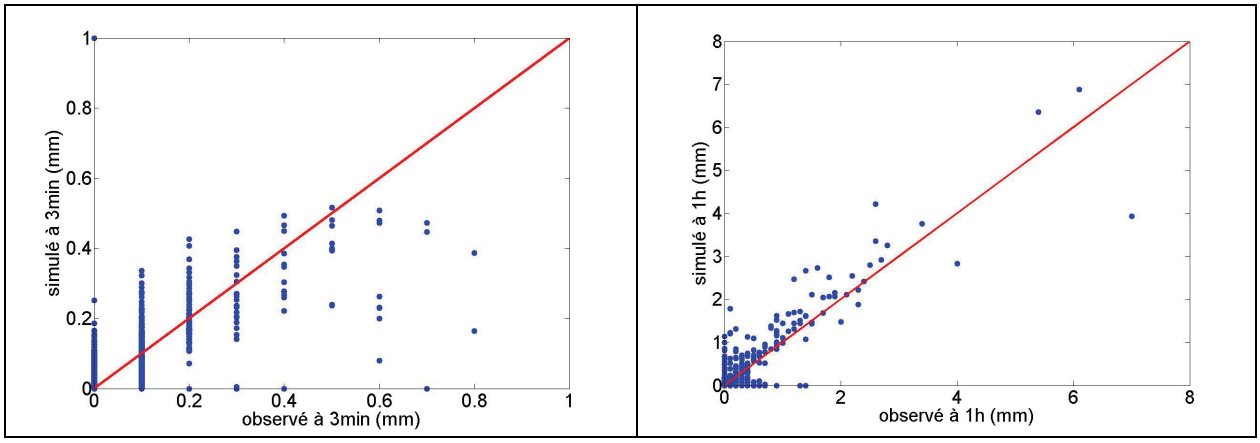


Figure 4: nuage de points des ruissellements observés et simulés, au pas de temps de 3min et 1h.

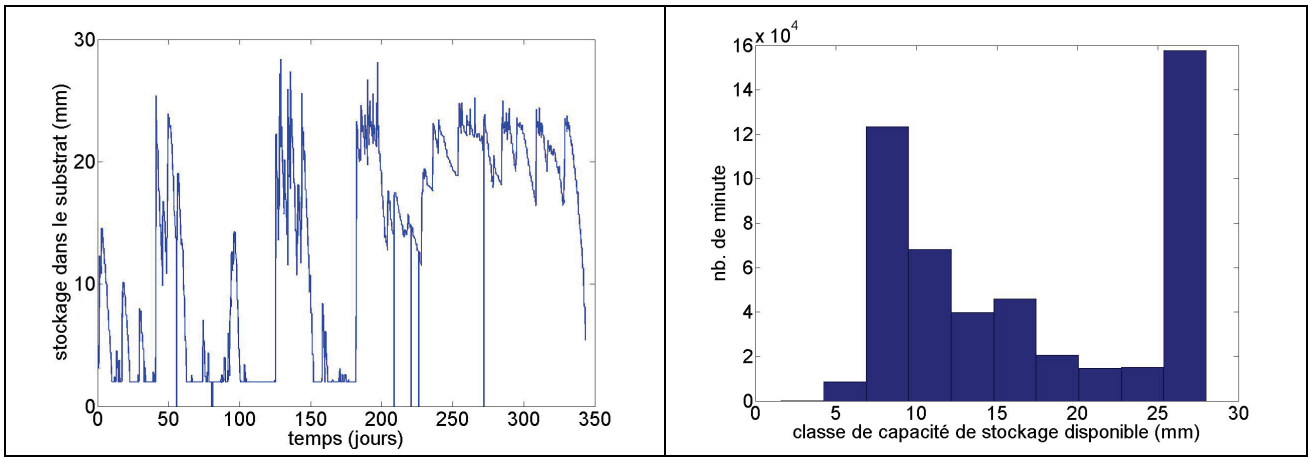


Figure 5: variation du stock d'eau simulé dans le substrat ($S_{sub}$) et histogramme de la capacité de stockage disponible (au pas de temps de 1min).

# 2 OBSERVATION DETAILLEE ET MODELISATION D'UN ECHANTILLON DE TAILLE REDUITE

L'analyse du comportement hydrique des TTV précédentes s'est avérée limitée par le fait que les observations disponibles étaient uniquement la pluie et le ruissellement. Afin d'étudier l'intérêt de détailler les observations, un lysimètre de taille réduite par pesée est développé et testé avec un échantillon de produit disponible sur le marché. L'analyse du comportement de l'échantillon et sa modélisation associée peuvent alors être plus précises et détaillées.

## 2.1 Développement d'un lysimètre par pesée

L'échantillon étudié est constitué de 2 bacs contigus, soit ½ $m^2$, du produit Hydropack® développé par la société Le Prieuré Végétal i.D. Un Hydropack® rassemble en un seul module l'ensemble des composants d'un TTV multicouches (Figure 6): une végétation pré-cultivée de type sédum, un substrat d'épaisseur 60mm, et à la base du module une partie en alvéoles (30% de la superficie) remplies de billes d'argile de hauteur 20mm permettant un stockage d'eau et une autre partie trouée qui permet l'évacuation du ruissellement. Il est à noter qu'un géotextile sépare la couche de substrat de la base du module et qu'une partie des racines de la végétation traversent ce géotextile et sont présentes dans les alvéoles.

Le lysimètre utilisé pour notre étude s'inspire du dispositif développé par Ramier et al. (2004). L'échantillon de TTV est posé sur une balance principale (portée 200kg, précision 2g soit 0,004mm). Le ruissellement évacué par les trous à la base du module est collecté et pesé sur une seconde balance (portée 60kg, précision 20g soit 0,04mm). Un limnimètre de type bulle à bulle (précision 1mm) est introduit dans une des alvéoles de l'échantillon : la mesure de hauteur d'eau ainsi effectuée est généralisée à toutes les alvéoles, en faisant l'hypothèse d'un niveau homogène dans ces alvéoles

(hypothèse vérifiée visuellement en soulevant le géotextile après quelques pluies). Le dispositif est installé en extérieur et complété par 2 pluviomètres (précisions 0,2mm) qui entourent le lysimètre. Toutes les mesures sont effectuées au pas de temps de 3min et exprimées en mm équivalents sur toute la superficie de l'échantillon. Pour ce travail, les résultats obtenus pendant une période de 9jours (du 1er septembre 2009, 07h, au 9 septembre,13h) sont analysés, avec un état initial moyennement humide de la TTV. Les données journalières d'évapotranspiration potentielles estimées par la station de Météo-France voisine (Choisnel, 1988) sont aussi acquises et transformées au pas de temps de 3min en introduisant le cycle diurne.

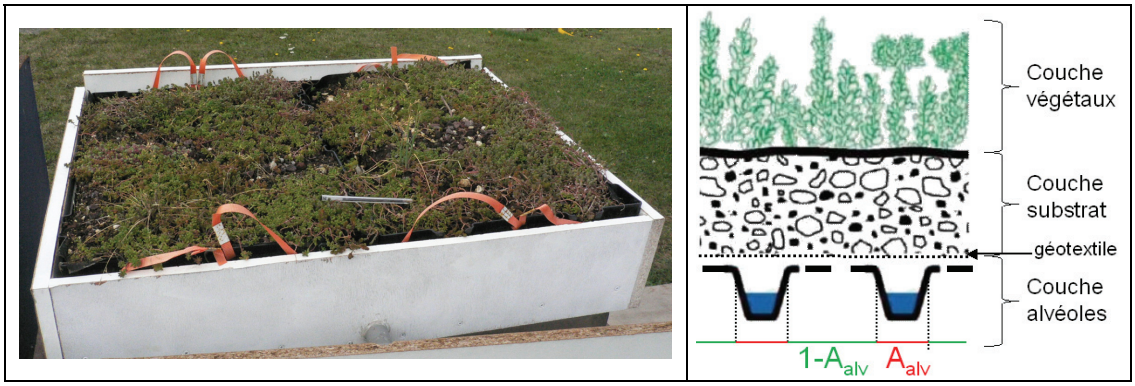


Figure 6: Photo de l'échantillon testé sur le site du LROP et schéma de sa structure

Le bilan hydrique observé sur la période est résumé dans le Tableau III et la Figure 7. Il est possible de calculer à chaque pas de temps de 3min le cumul des stockages à la surface et dans le substrat par différence entre le stockage total mesuré par la balance principale et le stockage dans les alvéoles mesuré par le limnimètre (en vert sur la Figure 7). Les mesures effectuées sont bruitées (à cause du vent pour la mesure du stockage total et à cause de la précision de mesure du limnimètre pour la mesure du stockage dans les alvéoles) mais les cycles d'humidifications et de séchages de la TTV ressortent clairement. La 1ère partie de la période étudiée comprend 3 événements pluvieux significatifs, entrecoupés par de courts épisodes de séchage ; la seconde partie se résume à un séchage de la TTV.

Lors des événements pluvieux, la TTV s'humidifie avec un maximum de stockage équivalent à 25mm d'eau, dont 6mm dans les alvéoles pleines (=20x0,3). Du ruissellement apparaît lors du 1er événement (ruissellement<1mm) mais surtout lors du 3ème qui est plus important. Les dynamiques de formation du ruissellement et de remplissage des alvéoles sont équivalentes et plutôt rapides, ce qui signifie un transfert efficace dans le substrat. Il est à noter que lors du 2nd événement qui est long et peu intense, les alvéoles se remplissent au ¾ alors que le ruissellement évacué est négligeable. Ce constat signifie que l'eau va préférentiellement alimenter les alvéoles, même si ces alvéoles ne couvrent que 30% du fond du module. Lors des premières séquences de séchage (jusqu'à la 4000ème min), l'eau est extraite préférentiellement dans les alvéoles (eau libre) mais aussi un petit peu dans le substrat. Par contre, dans la seconde partie de la période étudiée, c'est dans un 1er temps l'eau des alvéoles qui est utilisée par les plantes, et une fois les alvéoles vides (8000ème min), l'évapotranspiration puise dans le substrat de la TTV. Il est à noter a priori une incohérence dans les mesures de cette seconde partie car il n'apparaît pas logique que le substrat se ré-humidifie en période de séchage (à confirmer sur d'autres périodes). Il est intéressant de comparer sur cette 2ème partie l'évapotranspiration de la TTV avec l'évapotranspiration potentielle journalière fournie par Météo-France qui correspond théoriquement à celle d'un gazon ras et vert : du 5 au 8 septembre inclus, l'évapotranspiration potentielle est de 2,5mm, 2,5mm, 3,3mm et 3,8mm alors que celle de la TTV est de 2,4mm, 2,6mm, 3,1mm et 3,9mm, soit équivalente aux valeurs potentielles même lors des 2 derniers jours lorsque les alvéoles sont vides. Ce résultat est à priori assez étonnant car la végétation présente sur la TTV est bien moins dense qu'un gazon, il illustre la forte capacité de l'échantillon testé, ce qui est plutôt un point positif pour la gestion des eaux pluviales.

| | Pluie | Ruissellement | Evapotranspiration | Stockage |
|---|---|---|---|---|
| Observé | 24,8 | 6,6 | 25,1 | -7,0 |
| *Simulé* | - | *7,2* | *25,3* | *-7,7* |

Tableau III: bilan hydrique (en mm) observé et simulé pendant l'expérience sur le site du LROP

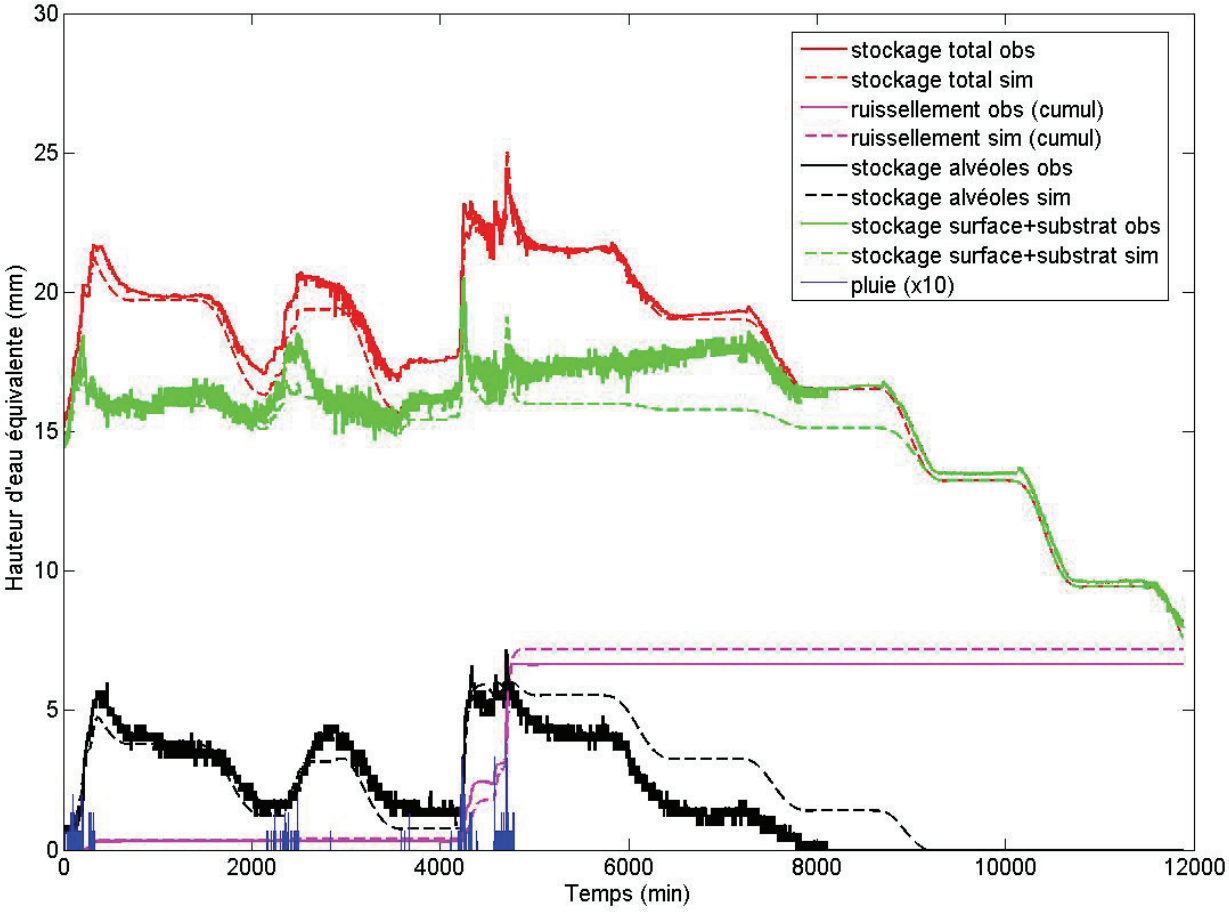


Figure 7: Évolution des bilans hydriques observé (lignes continues) et simulé (lignes pointillées) pendant l'expérience sur le site du LROP (au pas de temps de 3min)

## 2.2 Simulation

### *2.2.1 Développement du modèle précédent*

Par rapport au modèle utilisé pour le panneau du CSTB, la différence principale est l'existence d'une couche supplémentaire dans l'échantillon de TTV constituée par les alvéoles. Les équations sont donc les mêmes que précédemment (cf. § 2.2.1) avec les corrections et compléments suivants (voir Tableau II et Figure 8 pour le schéma de modélisation et ses paramètres et variables) :

<u>Calcul des flux au pas de temps i, en fonction des stocks d'eau au pas de temps (i-1) :</u>

si P(i)=0 si $S_{veg}(i-1)>0$, $E_{veg}(i)=\min[S_{veg}(i-1),ETP(i)]$ ; $E_{sub}(i)=0$ ;

sinon $E_{veg}(i)=0$ ; $E_{totale}(i)=\min[ETP(i),(S_{alv}(i-1)+S_{sub}(i-1)-C_{sub_wilt}].LAI_{veg}/LAI$ ;

$E_{alv}(i)= E_{totale}(i).(S_{alv}(i-1)/C_{alv})^{0,3}$ ; $E_{sub}(i)= E_{totale}(i)-E_{alv}(i)$ ;

si P(i)>0 $E_{veg}(i)= E_{sub}(i)= E_{alv}(i)=0$ ;

$I_{sub}(i)=\max[P(i)-(C_{veg}-S_{veg}(i-1)),0]$ ;

$D_{sub}(i)=\max[K_{sub}/(d_{sub}.\Delta t).(S_{sub}(i-1)-C_{sub_fc}),0]$ ;

$I_{alv}(i)=D_{sub}(i).[1-(1-A_{alv}).(S_{alv}(i-1)/C_{alv})^4]$ ;

$R_{alv}(i)=\max[I_{alv}(i)-C_{alv}+S_{alv}(i-1),0]$ ;

$R(i)=R_{alv}(i)+D_{sub}(i)- I_{alv}(i)$ ;

Calcul des nouveaux stocks d'eau au pas de temps i :

$S_{veg}(i)=S_{veg}(i-1)+P(i)-E_{veg}(i)-I_{sub}(i)$ ;

$S_{sub}(i)=S_{sub}(i-1)+I_{sub}(i)-E_{sub}(i)-D_{sub}(i)$ ;

$S_{alv}(i)=S_{alv}(i-1)+I_{alv}(i)-E_{alv}(i)-R_{alv}(i)$ ;

Certaines paramétrisations et paramètres ont été calés à partir des observations. La paramétrisation de l'infiltration dans les alvéoles $I_{alv}$ traduit le fait qu'une partie du drainage gravitationnel du substrat $D_{sub}$ qui ne tombe pas directement dans les alvéoles arrivent quand même à les rejoindre, cette part étant d'autant plus importante que les alvéoles sont peu remplies. L'évapotranspiration totale $E_{totale}$ provient d'eau du substrat et des alvéoles, selon une répartition qui est fonction du remplissage des alvéoles (eau libre).

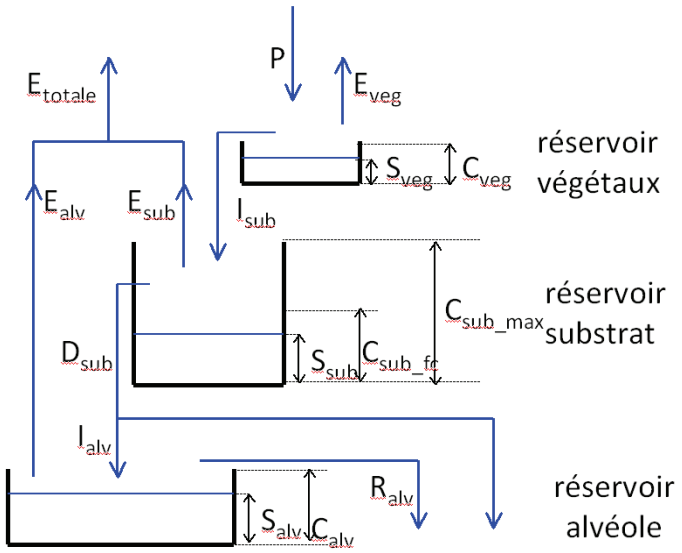


Figure 8: Schéma du modèle dédié à l'expérience sur le site du LROP

### *2.2.2 Résultats et discussions*

Le modèle est appliqué en continu au pas de temps de 15s sur la période d'observation. Les résultats représentés Figure 7 et Tableau III sont satisfaisants : les stockages dans le substrat (en vert) et dans les alvéoles (en noir) sont très correctement reproduits. Ce constat est valable aussi bien pour les phases d'humidication-séchage de la 1ère partie que pour la longue phase de séchage de la 2nd partie. Les choix du type de modélisation (réservoirs à 3 couches) et de schémas d'échanges des flux d'eau (notions de capacités aux champs et de point de flétrissement) sont donc pertinents pour représenter le comportement hydrique de la TTV testée sur la période d'observation. Il apparaît une unique différence entre la simulation et les observations : au début de la longue phase de séchage, le stock simulé dans les alvéoles ne diminue pas aussi rapidement que celui observé (on rappelle toutefois que la diminution observée est très importante et impliquerait une étonnante ré-humidification du substrat).

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le bilan hydrique des toitures végétalisées reste partiellement méconnu, principalement du fait d'un manque d'informations sur tous les flux d'eau concernés. Cette méconnaissance est un frein pour correctement concevoir et dimensionner les structures des toitures ; elle empêche aussi une évaluation correcte de l'impact de la technique sur la gestion des eaux pluviales à l'échelle de la ville. Le travail présenté dans cet article, qui s'apparente à une étude préliminaire, poursuivait un double objectif : i) évaluer l'intérêt d'un suivi expérimental détaillé du bilan, c'est à dire non limité à la transformation pluie-ruissellement, et ii) développer une modélisation conceptuelle de type réservoir, à partir des bases de données en notre possession. Deux bases de données ont été utilisées : celle du CSTB portant sur une toiture (146m$^2$) et un panneau (1m$^2$), base de données longue (1an) mais limitée à l'observation de la pluie et du ruissellement, et celle du LROP portant sur un échantillon de ½

$m^2$ de durée courte (9jours) mais détaillée avec l'observation de l'évapotranspiration et du stockage d'eau dans la TTV.

L'intérêt d'un suivi détaillé apparaît clairement si l'on compare les analyses que l'on a pu faire sur le panneau du CSTB avec celles menées sur l'échantillon au LROP : la connaissance des différents flux et stockages sur l'échantillon du LROP a permis une compréhension beaucoup plus poussée de la répartition du bilan hydrique ; le modèle développé associé est plus satisfaisant avec des résultats plus justes et robustes. Dans l'avenir, il faut développer ce type de suivi expérimental sur de longues durées, sur différentes toitures (types de substrat, de végétation, ...) et climats. Un lysimètre par pesée est apparu une technique très satisfaisante pour ce type de suivi ; par contre il est applicable uniquement sur des échantillons de taille réduite. A taille réelle et in situ, le suivi détaillé du bilan hydrique pose encore selon nous des difficultés expérimentales: par exemple, comment mesurer l'évapotranspiration ?

Le type de modélisation testé (conceptuel à réservoir) est apparu pertinent pour reproduire les bilans observés et à terme les extrapoler à d'autres conditions (autres structures et autres climats). L'utilisation de schémas existants pour représenter les différents flux d'eau échangés entre les réservoirs s'est avérée très satisfaisante. Pour l'instant, certaines paramétrisations de flux ont été calées sur des périodes d'observations trop courtes (c'est le cas pour l'expérience du LROP) ; elles méritent sûrement d'être revues à partir d'observations de plus longues durées mais aussi de considérations théoriques. Les schémas d'évapotranspiration peuvent sûrement être améliorés, ils devront tenir compte de l'évolution de la végétation au cours des différentes saisons.

***Remerciements :***

*Nous tenons à remercier la société Le Prieuré Végétal i.D. et son directeur R.Lamé pour la mise à disposition gracieuse d'échantillons de son produit Hydropack®.*

## BIBLIOGRAPHIE

Baraglioli A., Guillon A., Kovacs Y., Senechal C., (2008). Studies on the quantity impacts of green roofs. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh (Scotland).

Choisnel, E., (1988). Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir de données météorologiques. *La météorologie*, 7(23), 19-27.

De Gouvello B., Berthineau B., (2005). Caractériser les performances des toitures végétalisées. I*n Le point sur l'eau, e-Cahiers du CSTB n°3535*, 17-19.

De Gouvello B., (2007). Vers une caractérisation des débits de fuite des toitures végétalisées. *In Le point sur Terrasses et toitures végétalisées, e-Cahiers du CSTB n°3603*, 12-13.

Lassalle F., (2008). Végétalisation extensive des terrasses et toitures. *Guide technique édition Le Moniteur, 243 p*, ISBN 978-2-281-11416-4.

Mentens J., Raes D., Hermy M., (2006 ). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century. *Landscape and Urban Planning*, 77, 217-226.

Noilhan, J. and Planton, S., (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117, 536-549.

Palla A., Lanza L.G., La Barbera P., (2008a). A green roof experimental site in the Mediterranean climate. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh (Scotland).

Palla A., Berretta C., Lanza L.G., La Barbera P., (2008b). Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh (Scotland).

Ramier, D., Berthier, E. and Andrieu, H., (2004). An urban lysimeter to asses runoff losses on asphalt concrete plates. *Physical and Chemistry of the Earth*, 29, 839-847.

Uhl M., Schiedt L., (2008). Green roof storm water retention – monitoring results. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh (Scotland).