



**HAL**  
open science

## Evapotranspiration d'une toiture végétalisée expérimentale : observations et modélisation

Ahmeda Assann Ouédraogo, Emmanuel Berthier, David Ramier, Tan Yanlin,  
Marie-Christine Gromaire

► **To cite this version:**

Ahmeda Assann Ouédraogo, Emmanuel Berthier, David Ramier, Tan Yanlin, Marie-Christine Gromaire. Evapotranspiration d'une toiture végétalisée expérimentale : observations et modélisation. JDHU - JOURNÉES DOCTORALES EN HYDROLOGIE URBAINE 2022, Oct 2022, LYON, France. hal-03898928

**HAL Id: hal-03898928**

**<https://enpc.hal.science/hal-03898928>**

Submitted on 14 Dec 2022

**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.

## Évapotranspiration d'une toiture végétalisée expérimentale : observations et modélisation

Ouedraogo A.A.<sup>1\*</sup>, Berthier E.<sup>1</sup>, Ramier D.<sup>1</sup>, Tan Y.<sup>1</sup>, Gromaire M.<sup>2</sup>,

1 Equipe TEAM, Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema), 12 rue Teisserenc de Bort, F 78190 Trappes, France.

2 Leesu, Ecole des Ponts, Université Paris Est Creteil, F 77455 Marne-la-Vallée, France.

\* ahmeda.ouedraogo@cerema.fr

### Résumé court

L'évapotranspiration (ET) est un processus important dans les ouvrages végétalisés de gestion des eaux pluviales dont l'objectif n'est pas seulement de réduire le ruissellement urbain mais aussi de favoriser un rafraîchissement et/ou une restauration d'un bilan hydrologique plus proche du milieu naturel. Cependant, sa mesure et aussi sa modélisation dans ces ouvrages, et en particulier sur les toitures végétalisées (TV) restent parfois difficiles et/ou méconnues. Des mesures d'ET par bilan hydrologique, par bilan d'énergie et par une chambre à ET ont été effectuées dans différents compartiments d'une TV expérimentale du Cerema (Trappes, Ile de France). Il est prévu une modélisation du flux dans ces compartiments avec le modèle hydrologique Hydrus. Les résultats obtenus sont des estimations et des comparaisons du flux entre les compartiments testés à différentes échelles temporelles (de l'heure à l'année). Ces observations permettent de comprendre les déterminants de l'ET et de proposer des pistes de modélisation de l'ET sur ces TV.

**Mots-clés :** évapotranspiration, observation, modélisation, toitures-végétalisées, milieu-urbain

### Introduction

Les toitures végétalisées (TV) s'intègrent dans la grande famille des ouvrages végétalisés (noues d'infiltration, jardins de pluies, parkings perméables, etc.) de gestion à la source des eaux pluviales. Dans un contexte de changement climatique et de forte imperméabilisation du milieu urbain qui favorisent le ruissellement et l'augmentation de la température ambiante, ces nouveaux outils de gestion des eaux pluviales urbaines viennent compléter les outils conventionnels (réservoirs, réseaux enterrés d'eaux pluviales, etc.) existants en limitant le ruissellement au profit de l'infiltration et de l'évapotranspiration (ET). Ces ouvrages permettent l'abattement du ruissellement pour les pluies courantes, contribuent au rafraîchissement du milieu pendant les périodes chaudes et à la restauration d'un bilan hydrologique urbain plus proche du bilan hydrologique naturel.

Une étude de la performance des TV dans 21 pays synthétisant 75 études internationales publiées entre 2005 et 2020 montre que les taux de rétention événementiels (c'est-à-dire la proportion de pluie retenue et abattue par événement) sont très variables (0-100%), avec une moyenne autour de 62% (Zheng et al. 2021). Ces variabilités s'expliquent par des facteurs tels que l'intensité des pluies, la profondeur du substrat, le type de climat, le type de végétation et le type de saison. Si la capacité des TV à réduire le ruissellement est largement étudiée, les processus qui permettent à ces dernières d'être performantes sont insuffisamment documentés. En effet, lorsqu'il pleut, une partie de l'eau va être interceptée par la végétation (processus d'interception) et l'autre partie par le processus d'infiltration arrive dans les pores du substrat de la toiture, et c'est le processus d'ET (transpiration et évaporation) qui permet de restaurer la capacité de stockage de ces pores.

Dans ce travail, une attention particulière est portée sur l'ET et les principaux objectifs poursuivis se situent à trois niveaux : i) évaluation de l'ET à partir de la base de données mesurées disponibles ; ii) compréhension des facteurs de l'ET sur une toiture végétalisée et iii) modélisation de l'ET avec un modèle hydrologique.

### Matériels et méthodes

Le dispositif expérimental mis en place est une toiture végétalisée extensive installée à Trappes (Ile de France) sur le site du Cerema. Il est composé de différentes structures de végétalisation extensive, en faisant varier un seul paramètre entre chaque structure. Le toit a donc été divisé en six compartiments végétalisés de 35 m<sup>2</sup> (7x5 m) et deux compartiments de référence de 21 m<sup>2</sup> (7x3 m) dont un a été laissé avec seulement l'étanchéité et un

autre avec des graviers. Les six compartiments végétalisés ont des compositions différentes. Le couvert végétal (sedum et/ou graminée), l'épaisseur (3 cm ou 15 cm), la nature du substrat (intensif ou extensif), et le type de couche de drainage (polystyrène expansée ou de pouzzolane) ont été modifiés d'un compartiment à l'autre.

Un pluviomètre et des augets permettent de mesurer respectivement la pluie et le débit de drainage à la sortie de la gouttière de chaque compartiment. Une station météorologique 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. Pour chaque compartiment, des capteurs ont permis le suivi de la teneur en eau et de la température à différentes profondeurs dans le substrat. On dispose aussi de mesures directes d'évapotranspiration ponctuelles, spatialement et temporellement, à l'aide d'une chambre (Loustau et al. 1991). L'ensemble des données a été acquis à un pas de temps fin sur une période de plusieurs années de juillet 2011 à juillet 2018.



Figure 1: Toiture végétalisée de Trappes. À droite du toit se trouve la station météo, à gauche de cette station, le pluviomètre. Les bacs verts au pied du bâtiment contiennent les augets pour la mesure des débits de drainage issus des gouttières. Les symboles sont définis selon : G : Graminées, S : Sedum, E : Extensive, I : Intensive, 15 cm ou 3 cm pour l'épaisseur de substrat, polystyrène expansé (Y) ou pouzzolane (Z) pour la nature de la couche de drainage et N pour sol nu.

L'ET est estimée pour chaque compartiment :

- i) par bilan hydrologique, qui s'exprime avec la pluie (P), le débit de drainage sortant (Q), et les variations de stock d'eau ( $d\theta$ ) dans les structures des toitures végétalisées :

$$ET = P - Q - d\theta \text{ (en mm)} \quad (1)$$

- ii) par bilan énergétique de surface, grâce aux mesures du rayonnement net ( $Q^*$ ) par un radiomètre et des profils de température mesurés par des thermocouples dans les toitures végétalisées :

$$ET = Q^* - Q_G - Q_H \text{ (en } w \cdot m^{-2}) \quad (2)$$

avec  $Q_G$  le flux de chaleur entrant dans le substrat de chaque compartiment et  $Q_H$  le flux de chaleur sensible. Ces flux sont estimés à partir des températures mesurées à la surface des différents compartiments végétalisés et de l'air.

- iii) par une chambre à évapotranspiration développée au Cerema : il s'agit de mesurer les variations d'humidité à l'intérieur d'une enceinte fermée (Loustau et al. 1991). Pour ce cas d'étude, l'enceinte est en polyméthacrylate de méthyle d'une surface de 1 m<sup>2</sup> et d'une hauteur de 30 cm. Une embase métallique est utilisée pour étanchéifier le sol. Le flux d'ET est calculé pour les différents compartiments de la toiture végétalisée selon la formule suivante :

$$ET = 10^{-3} Lh \frac{\Delta p_v}{\Delta t} \quad (\text{en w. m}^{-2}) \quad (3)$$

avec  $p_v$  l'humidité absolue (en  $\text{g. m}^{-3}$ ),  $L$  la chaleur latente de vaporisation,  $h$  la hauteur de l'enceinte et  $t$  le temps (s).

Le modèle Hydrus 1D (Simunek et al. 1998), qui résout l'équation de Richards pour des milieux variablement saturés en eau, seront utilisés pour modéliser l'ET de chaque compartiment de la toiture. Les profils de teneur en eau et les données de ruissellement seront mobilisés pour le calage du modèle. L'évapotranspiration potentielle constitue une entrée dans ce modèle hydrologique et il est prévu dans un premier temps d'utiliser l'ET potentielle ( $ET_p$ ) paramétrée selon Penman-Monteith (1965).

## Premiers résultats

La Figure 2 représente les ETs réelles estimées par bilan hydrologique. Sur les sept (7) années (2563 jours) de données traitées, seules 42 à 55% des jours selon le compartiment (SE3Y : 44%, SE15Y : 44%, SE3Z : 55%, GE15Y : 44%, GI15Y : 42% et NE3Y : 50%) ont pu être validés et utilisés pour estimer les ETs. La dynamique annuelle de l'ET y est illustrée avec des valeurs journalières pouvant atteindre 10 mm au printemps et en été, et des valeurs faibles en hiver et en automne. Les études pilotes (lysimètres imitant les toitures végétalisées) menées en Europe et aux USA confirment ces résultats indiquant des ETs journalières généralement estimées entre 0,5 et 10 mm (Ebrahimian et al. 2019) pour des climats tempérés. Quant à la saisonnalité du flux d'ET, elle est liée aux facteurs atmosphériques (le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité de l'air et la température de l'air).

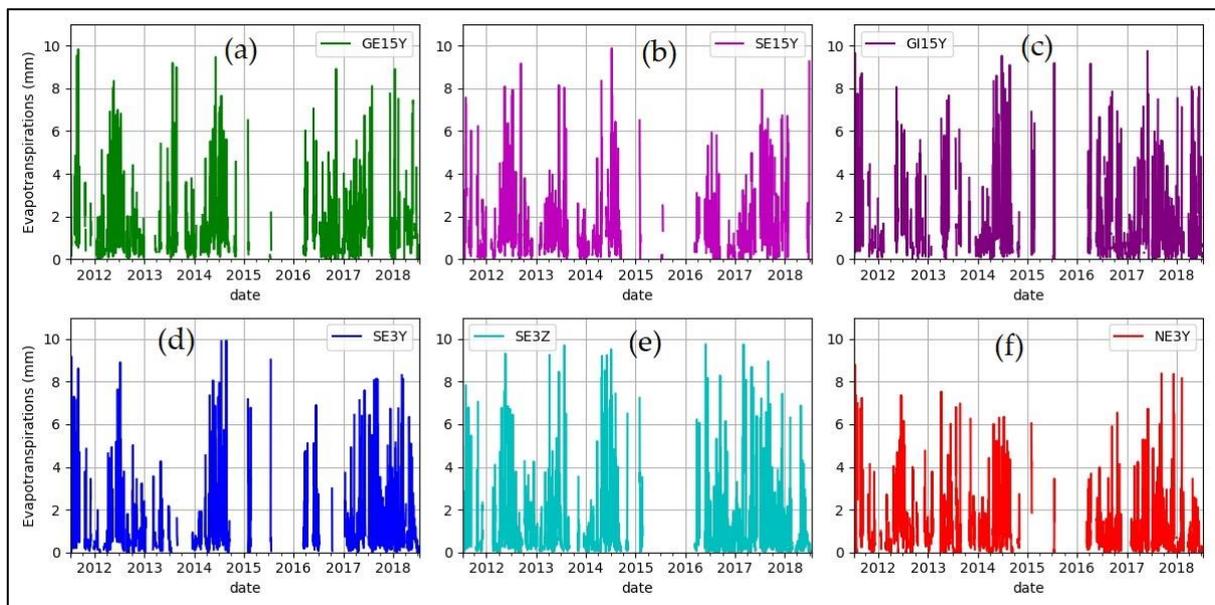


Figure 2: Evapotranspiration estimée par bilan hydrologique au pas journalier pour les six compartiments de la toiture végétalisée du Trappes du 8 juillet 2011 au 14 juillet 2018. Les compartiments suivants sont représentés : (a) Graminées, Extensive, 15 cm de substrat et polystyrène expansé (Y), (b) Sedum, Extensive, 15 cm de substrat et polystyrène expansé (Y), (c) Graminées, Intensive, 15 cm et polystyrène expansé, (d) Sedum, Extensive, 3 cm de substrat et polystyrène expansé (Y), (e) Sedum, Extensive, 3 cm de substrat, pouzzolane (Z) et (f) Sol Nu (N), Extensive, 3 cm de substrat et du polystyrène expansé.

Les facteurs liés au substrat (épaisseur et type) et aux végétaux (sedum ou graminées) ont été testés dans cette étude. Sur toute la période d'analyse, on a 966 jours secs (c'est-à-dire sans pluie et sans drainage). Ces périodes sont propices à l'étude d'impact sur l'ET du fait de la réduction du nombre de variables impliquées dans l'estimation du flux (donc moins d'incertitude). Le tableau 1 illustre une comparaison entre les différents compartiments de la TV sur l'ensemble des périodes sèches valides (415 à 486 jours). D'abord, on note un faible impact de la végétation pour les substrats de 3 cm (SE3Y et le NE3Y ont respectivement des cumuls

totaux de 158.4 mm et 171.5 mm). Ensuite, pour un même type de végétation (le sedum dans notre cas), plus le substrat est épais, et plus on a d'évapotranspiration (SE3Y et le SE15Y ont respectivement des cumuls totaux de 117 mm et 315 mm). Ces observations indiquent l'importance du stock d'eau disponible pour l'ET qui augmente lorsque pour un même type de substrat, l'épaisseur augmente. Aussi, le substrat intensif (GI15Y, 331 mm) qui retient mieux l'eau évapo-transpire plus par rapport au substrat extensif plus grossier (GE15Y, 266.7 mm). Enfin, on remarque que l'ET du sedum (293.6 mm) est plus importante que celle des graminées (265.8 mm) en cumuls. Ces premières comparaisons de cumuls permettent d'illustrer l'impact de chaque configuration sur le flux d'ET. Cependant, une plus grande fiabilité de ces résultats passe principalement par l'estimation des incertitudes de mesures associées et aussi par la comparaison avec d'autres méthodes d'estimation du flux d'ET.

Tableau 1: Comparaison des différentes configurations de toiture végétalisée à partir de toutes les périodes sèche (c'est-à-dire sans pluie et sans ruissellement) de juillet 2011 à juillet 2018.

Determinants		Nombre de données communes/valides (2011-2018)	ET journalière (mm/j) (Statistique descriptive)			Cumuls d'ET sur les jours valides communes (mm)
			Min - max	Ecartype	Moyenne	
Epaisseur du Substrat	SE15Y	282/420	0 - 9.26	1.26	1.11	315
	SE3Y	282/415	0 - 2.38	0.38	0.42	117
Type de substrat	GE15Y	264/431	0 - 7.11	0.92	1.01	266.7
	GI15Y	264/359	0 - 8.06	1.32	1.25	331.1
Type de vegetation	SE15Y	310/420	0 - 9.26	1.14	0.94	293.6
	GE15Y	310/431	0 - 7.11	0.85	0.85	265.8
Presence ou absence de vegetation	SE3Y	338/415	0 - 3	0.44	0.47	158.4
	NE3Y	338/486	0 - 3.2	0.66	0.5	171.5

## Conclusion

L'ET d'une toiture végétalisée peut atteindre 10 mm/j et reste non négligeable même en l'absence de végétation (max d'ET de 7.4 mm/j). Si l'épaisseur du substrat est un facteur prépondérant qui augmente l'ET pour une même végétation, le type de végétation reste un facteur influent : les sedums ont montré une ET totale plus importante que les graminées durant les périodes sèches (293 mm vs 265.8 mm). Lors de la présentation en octobre, il est prévu des résultats d'estimation de l'ET par toutes les différentes méthodes précitées et une modélisation de l'ET sur un des compartiments de la TV avec le modèle hydrologique Hydrus.

## Références

- Ebrahimian A, Wadzuk B, Traver R (2019) Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems. *Sci Total Environ* 688:797–810
- Loustau D, Cochard H, Sartore M, Guédon M (1991) Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia caerulea* (L) Moench). *Ann Sci For* 48:29–45. <https://doi.org/10.1051/forest:19910103>
- Monteith JL (1965) Evaporation and environment. *Symp Soc Exp Biol* 19:205–234
- Sabre A, Ramier D, Bouyer J, Bouzouidja R, Tétard Y, Dussuchale A, Chollet J, Clavier R (2015) Toitures végétales pour rafraîchir les ambiances climatiques urbaines, Axe 1 – Evaluation du potentiel de rafraîchissement des toitures végétalisées, L1.1 Caractéristiques du bilan énergétique. Rapport d'une étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Cerema/DTerIDF Ile-de-France, Cerema/DTerEST Nancy, CSTB Nantes.
- Simunek J, Sejna M, Van Genuchten MT, et al (1998) HYDRUS-1D. Simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, version 4.
- van Genuchten MT (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci Soc Am J* 44:892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Zheng X, Zou Y, Lounsbury AW, et al (2021) Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance. *Resour Conserv Recycl* 170:105577. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105577>