



ACTION R3.1 : EVAPOTRANSPIRATION ISSUE DE SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE POUR LA GESTION A LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES URBAINES : ANALYSE A PARTIR D'OBSERVATIONS ET DE MODELISATION HYDROLOGIQUES

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Selon les Nations Unies (2018), la population mondiale est de plus en plus urbaine, passant de 55% en 2018 à une projection de 68% d'ici 2050, soit 6,7 milliards de personnes. En France, la part de la population résidant en zones urbaines a fortement augmenté, passant de 55 à 80% entre 1950 et 2018. Cette urbanisation croissante engendre de nombreuses conséquences pour les villes et leurs habitants (Grimm et al., 2008) : i) une émission accrue de gaz à effet de serre amplifiant le changement climatique ; ii) une pollution de l'air, des milieux aquatiques et des sols, impactant la santé humaine et les écosystèmes et iii) une aggravation des risques liés aux événements météorologiques extrêmes tels que les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur, avec des conséquences économiques, de confort urbain et même de mise en danger des vies humaines. Face à ces défis, les villes de demain doivent garantir un cadre de vie de qualité et durable pour leurs résidents. La gestion durable des eaux pluviales urbaines constitue ainsi un des enjeux majeurs pour les villes de demain.

Au XXI^e siècle, la nouvelle approche de gestion des eaux pluviales urbaines combine la gestion traditionnelle des conduites avec des solutions fondées sur la nature (SfN). Ces SfN sont définies par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature - France (2018) comme des actions qui visent à protéger, gérer durablement et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés. Elles consistent à gérer l'eau à la source, dans des ouvrages perméables, végétalisés ou non, favorisant les processus hydrologiques de rétention, d'infiltration et d'évapotranspiration (ET), ainsi que les processus épuratoires. Cette approche permet d'éviter les coûteux réseaux de transport de l'eau pluviale (Joseph et al., 2022). Les SfN peuvent également être conçues de manière étanche dans certains contextes, l'évapotranspiration devenant alors le principal processus pour atténuer le ruissellement. En plus de son rôle hydrologique d'atténuation du ruissellement, le flux d'ET contribue également au rafraîchissement local (Qiu et al., 2023). L'ET est aussi importante pour assurer un développement optimal de la végétation urbaine, avec une tension croissante sur la ressource en eau et une recrudescence des périodes de sécheresse. Dans un contexte marqué par une urbanisation intense et un changement climatique, une compréhension plus précise de l'ET issue des SfN émerge comme un enjeu crucial pour contribuer à en atténuer les conséquences et favoriser des environnements urbains plus agréables et plus durables.

La mesure de l'ET est bien établie dans les contextes agricoles et naturels. Cependant, son application en ville est récente et présente des défis spécifiques. La complexité des environnements urbains, caractérisés par leur diversité et leur interaction avec des objets construits (bâtiments, revêtements, routes, etc.), rend la mesure de l'ET plus complexe (DiGiovanni-White et al., 2018; Saher et al., 2021). Les SfN en milieu urbain, avec leur variété de configurations et de fonctions, nécessitent des approches adaptées pour évaluer précisément l'ET vis-à-vis des enjeux qui diffèrent parfois du contexte agricole où ce sont principalement les enjeux de besoin en eau qui sont mis en avant sur des cultures souvent homogènes, de grandes superficies, et annuelles. La littérature scientifique traitant spécifiquement de l'ET dans le contexte des SfN en milieu urbain est limitée. Des études telles que celles menées par Hess et al. (2021a, 2019a, 2017) sur les jardins de pluie urbains ont initié l'exploration de ce domaine, elles se heurtent à des limites liées à la diversité des configurations à tester, aux périodes d'étude qui sont courtes, et à la généralisation de leurs résultats. Les toitures végétalisées, par exemple, ont suscité un intérêt particulier parmi les SfN (Ebrahimian et al., 2019; Jahanfar et al., 2018; Wadzuk et al., 2013), mais la recherche rencontre encore des obstacles, notamment en ce qui concerne la comparaison des différentes méthodes

de mesure du flux d'ET sur des toitures végétalisées expérimentales en conditions réelles ainsi que l'évaluation critique des approches couramment utilisées dans la littérature.

Quant à la modélisation hydrologique en milieu urbain, elle a longtemps accordé plus d'importance à l'écoulement de l'eau dans les réseaux d'eaux urbaines, tandis que l'ET a reçu moins d'attention de la part des chercheurs. La nouvelle tendance qui prône la re-végétalisation des milieux urbains nécessite une prise en compte adéquate de ce processus dans les modèles (Bechet et al., 2017). Les modélisations de l'ET dans les modèles hydrologiques, souvent d'origine agricole ou météorologique, peuvent parfois produire des résultats divergents (Berthier et al., 2006; Cascone et al., 2019) et nécessitent des adaptations aux contextes urbains marqués par une hétérogénéité microclimatique et des effets d'ombrage (Costello and Jones, 2014; Hörschemeyer et al., 2021; Jahanfar et al., 2018). C'est dans ce contexte, caractérisé par un besoin important d'approfondir les connaissances sur le processus d'ET, que s'inscrit la présente thèse.

L'objectif général de cette étude est d'améliorer la compréhension, l'estimation et la reproduction du processus d'évapotranspiration (ET) issu de solutions fondées sur la nature (SfN) dédiées à la gestion à la source des eaux pluviales urbaines. Des SfN qui sont équipées d'un massif de substrat infiltrant ont été étudiées, en couvrant diverses configurations en termes de nature de substrat, épaisseur de substrat, nature du couvert végétal, surface d'impluvium. Deux types de SfN ont ainsi été retenus : les toitures végétalisées, qui collectent généralement les précipitations directes, et les jardins de pluie, qui captent l'eau d'un bassin versant plus étendu. Ces derniers se distinguent également par un substrat plus proche d'un sol naturel et une diversité de strates végétales, et peuvent être conçus de manière étanche dans certains contextes.

Comment obtenir des estimations précises de l'ET issues des SfN grâce à des mesures expérimentales ? Quels sont les principaux facteurs influençant le flux d'ET dans ce contexte ? Quelle modélisation pour des analyses plus efficaces et à long terme du processus d'évapotranspiration dans ces solutions ? Ce sont les principales questions auxquelles nous avons tenté de répondre dans ce travail.

METHODOLOGIE

1. Description des sites d'étude

Les toitures-terrasses végétalisées expérimentales du Cerema (Ramier et al., 2011) et les lysimètres de jardins de pluie mis en place par la Ville de Paris au Museum National d'Histoire Naturelle (Nezeys et al., 2016) ont été retenus pour ce travail (Tableau 1). Ces expérimentations sont bien délimitées et reproduisent finement le fonctionnement des toitures végétalisées et des jardins de pluie. Ce sont des systèmes étanches avec une condition limite aval de suintement qui permet de maîtriser l'ensemble des termes du bilan hydrique et/ou du bilan d'énergie de surface. Les jeux de données acquis impliquent : i) une description détaillée des caractéristiques des sites, de la géométrie et de la structure des solutions mises en place ; ii) des données hydrologiques, thermiques et météorologiques complètes, avec des périodes d'observation longues et des pas de temps fin ; iii) une bonne qualification des données pour réduire les incertitudes sur l'évaluation de l'ET.

Ces données ont été soumises à un travail conséquent de traitement, de validation et de sélection pour en extraire les données exploitables. Le traitement des données a compris : i) la validation des fichiers bruts (vérification de l'intégrité des fichiers, correction d'éventuels doublons ou fichiers manquants, gestion des pas de temps, éventuelle restructuration des fichiers) ; ii) la lecture et concaténation des fichiers bruts pour les intervalles de temps d'acquisition ; iii) la définition des plages de valeurs acceptables pour chaque variable (identification et traitement des données incorrectes ou incertaines) ; et iv) l'analyse critique et validation de chaque variable quantitative (détection des valeurs aberrantes, jours de maintenance, anomalies significatives, etc.).

Les données sur les toitures végétalisées couvrent la période de juin 2011 à juillet 2018, avec une meilleure continuité des données non atmosphériques (teneur en eau, température de surface, débit de drainage) entre octobre 2012 et octobre 2014. Pour les jardins de pluie, les données sont disponibles sur trois ans,

de novembre 2016 à décembre 2019, avec une meilleure continuité entre février 2017 et juin 2018. Les périodes présentant des lacunes en données atmosphériques ont été comblées avec des données provenant des stations météorologiques proches de Météo-France, celle de Paris-Montsouris à 2,5 km du MNHN et celle de Trappes à quelques centaines de mètres du site du Cerema à Trappes.

Tableau 1 : Récapitulatif des caractéristiques des configurations d'ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales urbaine étudiés dans le cadre de la thèse

Type	Dispositif des toitures expérimentales de Trappes	Dispositif expérimental des jardins de pluie du MNHN	
Période d'étude (en année)	06/2011 – 07/2018	11/2016 – 12/2019	
Variables atmosphériques	Température de l'air, humidité relative, rayonnement globale, vitesse du vent et pression atmosphérique.		
Variables du bilan d'énergie	Température de surface, albédo	-	-
Variables hydrologiques	Pluie, teneur en eau, drainage et évapotranspiration mesurée	Pluie, drainage, niveau d'eau dans la réserve et masse des dispositifs	Pluie, niveau d'eau dans un évaporomètre
Couverture du dispositif	Sedums, plantes herbacées et substrat nu	Herbacées, arbustes, flore spontanée	Eau
Substrat	Substrats grossiers avec deux différentes teneurs de matière organique (34 mg/g et 58 mg/g de matière organique)	Substrat fin représentatifs des jardins de Paris	-
Surfaces Epaisseur de substrat	35 m² pour chaque configuration Epaisseurs de substrats de 3 cm et 15 cm	4 m² d'impluvium pour 1 m² de jardin par lysimètre 80 cm de substrat	Diamètre : 120,4 cm et hauteur : 25,4 cm
Conditions de drainage	Polystyrène expansé	Alvéoles, avec et sans réserve en eau	-

2. Estimation de l'ET à partir d'observations hydrologiques

Les ET des différentes configurations des SfN testées ont été calculées aux pas de temps de journalier par la méthode de bilan hydrologique. Pour les lysimètres de jardins de pluie du MNHN, l'ET est calculée pour chaque lysimètre selon l'équation suivante :

$$ET = 4 * P - D - \Delta S \text{ (en mm)} \quad (1)$$

avec P les précipitations, D le drainage et ΔS la variation de stock d'eau dans le lysimètre considéré. Quant à l'évaporation journalière (E) depuis de bac évaporimètre (nappe d'eau libre), elle s'exprime comme la différence entre les précipitations et la variation du niveau d'eau (ΔL) :

$$E = P - \Delta L \text{ (en mm)} \quad (2)$$

L'ET pour chaque configuration de la toiture végétalisée du Cerema a été estimée par l'équation suivante :

$$ET = P - \Delta S - D \text{ (mm)} \quad (3)$$

On fait l'hypothèse que la variation journalière du stock d'eau dans chaque plot (ΔS) peut être calculée à partir de la variation journalière de la teneur en eau du substrat (ΔS_{sub}) de la toiture (stocks d'eau dans les autres couches négligé). Les valeurs de ΔS_{su} sont calculées entre 00h00 et 23h59 à l'aide de la teneur en eau moyenne estimée selon :

$$\theta = \frac{\sum V_i \theta_i}{\sum V_i} \text{ (mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}\text{)} \quad (4)$$

avec θ_i la teneur en eau pour le capteur i , et V_i le volume de substrat attribué à chaque mesure valide du capteur i . Pour valider la teneur en eau moyenne θ , au moins une mesure de capteur doit être valide. Les estimations d'ET basées sur le bilan hydrologique n'ont été calculées que pour les jours sans pluie (957 jours, de juillet 2011 à juillet 2018).

3. Modélisation de l'ET à partir d'un modèle hydrologique

3.1. Description du modèle d'étude

Le modèle HYDRUS-1D a été choisi parmi la diversité des modèles d'hydrologie en raison de son approche physique pour simuler les processus d'interfaces sol, plantes et atmosphère associées à l'ET, de ses succès avérés dans les études hydrologiques antérieures sur les SfN, de son accessibilité et aussi de la facilité de sa mise en œuvre. La représentation en une dimension est due à la faible pente des SfN (pour le toit, elle est inférieure à 5% et les lysimètres sont horizontaux). Hydrus1D (Simunek et al., 1998) simule le transfert d'eau dans les milieux poreux et à saturation variable en résolvant l'équation de Richards (1931). La résolution de cette équation nécessite la définition des courbes caractéristiques du substrat caractérisées par : la teneur en eau à saturation (θ_s), la teneur en eau résiduelle (θ_r), la conductivité hydraulique à saturation (K_s), et paramètres de forme (n et α). Les conditions de flux atmosphériques sont appliquées à la limite supérieure du modèle (précipitations et évapotranspiration potentielle), tandis qu'une condition de suintement est appliquée au nœud inférieur du modèle.

Le schéma d'ET adopté dans la modélisation peut se décrire de la manière succincte suivante :

i) l'ET potentielle (ET_p) est calculée à partir de l'approche de Penman-Monteith (Monteith, 1965) :

$$ET_p = \frac{1}{L_e} \frac{\Delta(Q^* - Q_G) + \frac{\rho_a C_p}{r_a} \gamma(e_s - e_d)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \text{ (mm)} \quad (7)$$

où r_a ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) et r_s ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) sont respectivement les résistances aérodynamique et de surface. Δ , L_e , γ , ρ_a , C_p , e_s et e_d représentent respectivement la pente de la courbe de pression de vapeur saturante ($\text{Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), la chaleur latente de vaporisation, la constante psychrométrique ($\text{Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), la masse volumique de l'air ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), la capacité volumique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) et la pression de vapeur saturante (Pa) et la pression partielle de vapeur d'eau (Pa) ;

ii) une partition de l'ETP en transpiration potentielle (T_p) et évaporation potentielle (E_p) :

$$\begin{cases} T_p = ET_p(1 - e^{-k \times LAI}) = ET_p SCF \\ E_p = ET_p e^{-k \times LAI} = ET_p(1 - SCF) \end{cases} \quad (8)$$

où LAI est l'indice de surface foliaire (-), SCF est la fraction de couverture du sol (-), et k est une constante décrivant l'extinction du rayonnement par le couvert végétal ;

iii) l'évaporation réelle du sol est limitée par une pression minimale admissible en surface : des valeurs typiques de -15 m pour les toitures végétalisées et de -100 m pour les jardins de pluie ont été considérées. Au-dessus de ces seuils où le taux d'évaporation diminue en raison d'un substrat plus sec, l'évaporation se produit à son taux potentiel. Concernant la transpiration réelle, l'eau interceptée par les feuilles (jusqu'à un maximum de $a \times LAI$, où ' a ' est une constante empirique) est d'abord allouée à T_p . La transpiration

potentielle restante est alors utilisée pour évaluer l'absorption d'eau par les racines des plantes $S(t)$, suivant l'approche de Feddes (1982) :

$$S(t) = \alpha(h) T_p(t) \quad (9)$$

avec α la fonction de stress hydrique, h représente la pression du substrat. La fonction de stress est considérée linéaire et décrite par les paramètres suivants : P_0 la pression à laquelle les racines commencent à extraire l'eau du substrat, P_{Opt} la pression à laquelle les racines extraient l'eau au taux maximal, et P_3 indique la pression à laquelle l'absorption racinaire d'eau cesse, associée au point de flétrissement. La valeur de P_2 est influencée par la demande atmosphérique, et est décrite comme une fonction linéaire de T_p . Une paramétrisation typique inclut une limite supérieure, P_{2H} (forte demande atmosphérique pour $T_p > 5 \text{ mm.j}^{-1}$) et une limite inférieure, P_{2L} (faible demande atmosphérique, $T_p < 1 \text{ mm.j}^{-1}$). Le mécanisme de compensation est aussi défini par $w_c(-)$ pour s'assurer qu'en stress hydrique, les racines puissent extraire l'eau des autres zones non stressées. Le modèle intègre également la profondeur racinaire rd , et la distribution des racines le long du profil vertical du substrat est supposée être uniforme.

La gamme des valeurs de paramètres associées aux différentes configurations de SfN est résumée dans le Tableau 2, sur la base de l'analyse du substrat, ainsi que d'autres observations in situ et de valeurs rapportées dans la littérature (Bevilacqua et al., 2016; Bouzouidja et al., 2018; Breuer et al., 2003; Charpentier, 2015; Hess et al., 2021b; Li et al., 2019; Mesgouez et al., 2013; Ramier et al., 2017; Simunek et al., 1998). Les simulations ont été effectuées à l'aide du package Python SALib (Iwanaga et al., 2022). Une résolution de 5 minutes a été appliquée pendant les simulations, couvrant 10/2012 et 07/2018 pour les toitures végétalisées et de 02/2017 à 06/2018 pour la configuration de jardin de pluie modélisée.

Table 2 : Paramètres du modèle considérés dans cette étude. En bleu, des valeurs de références obtenues à partir de mesures expérimentales selon Ramier et al. (2017).

Paramètres			Espace des paramètres			
			Green roof			Rain Garden
			Sol nu (NE3Y)	Sedum (SE3Y / SE15Y)	Graminées (GE15Y)	Herbacées (RG80)
Soil	$\theta_r (\text{mm}^3 \text{mm}^{-3})$		0.02 – 0.1			0.05 – 0.15
	$\theta_s (\text{mm}^3 \text{mm}^{-3})$		0.35 – 0.6			0.4 – 0.6
	$\alpha (\text{mm}^{-1})$		0.001–0.06			0.001 – 0.07
	$n(-)$		1.15 – 3			1.15 – 2.5
	$K_s (\text{mm/min})$		0.31 – 153			0.05 – 2
Vegetation	PET	$Z_0 (\text{m})$	0.001 – 0.06	-	-	-
		$LAI (-)$	-	5 - 10	5- 10	5 - 10
		$h_{veg} (\text{m})$	-	0.1 – 0.2	0.1 – 0.5	0.1 – 0.6
		$r_{s,f} (\text{s/m})$	-	50 – 200	100 – 600	100 – 600
	Associated parameters	$rd (\text{mm})$	-	10 – 30 / 10 – 100	50 - 150	100 - 600
		a	-	0.02 – 0.2		0.02 – 0.3
		SCF	-	0.25 – 0.8	0.5 - 1	0.79 - 1
	Water absorption	$P_0 (\text{mm}), P_{Opt} (\text{mm})$	-	(-200) – (-10), (-500) – (-200)		
		$P_{2H} (\text{mm}), P_{2L} (\text{mm})$	-	(-4000) – (-2000), (-15000) – (-5000)		
		$P_3 (\text{mm}), w_c (-)$	-	(-30000) – (-15000), 0.4 - 1		

3.2. Calage et exploitation des simulations issues du modèle

Le calage du modèle a nécessité un échantillonnage aléatoire et uniforme dans les espaces des paramètres selon la méthode de Sobol (plus de détail dans Saltelli et al. (2010)). Pour la configuration du substrat nu, 8192 simulations ont été effectuées avec six paramètres sélectionnés, tandis que les configurations végétalisées ont nécessité 17 paramètres, avec 19436 simulations. Le critère de Kling et al. (2012) a été utilisé pour comparer les valeurs simulées et observées :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta_m - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (10)$$

où la corrélation r évalue l'écart dans la forme et le timing des valeurs simulées par rapport aux valeurs observées, le biais β_m est le rapport des moyennes des valeurs simulées sur les valeurs observées et γ le rapport de l'écart-type simulé sur l'écart-type observé, mesurant l'erreur de variabilité. Les valeurs de KGE proches de 1 illustrent les bonnes simulations alors que les valeurs négatives sont associées à de mauvaises performances du modèle.

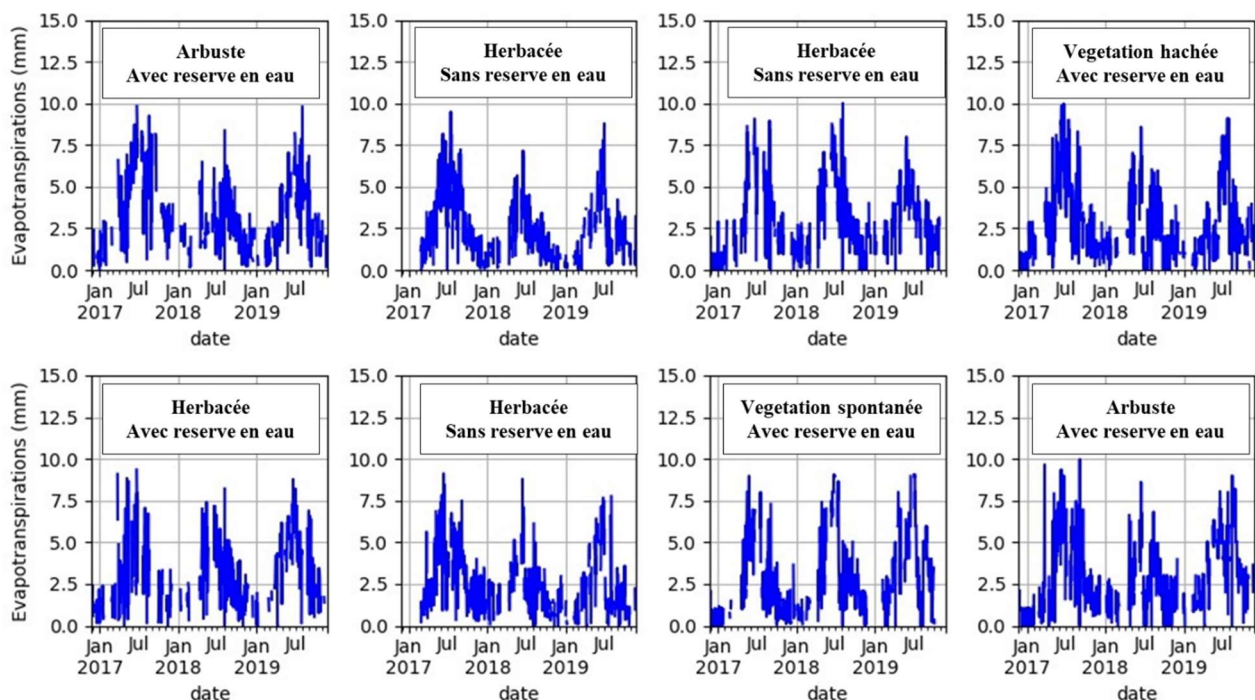
Notre analyse dans ce contexte se focalise sur l'évaluation de l'ET pour chaque configuration de SfN testée, en considérant les échelles temporelles de la saison et de l'année. L'objectif est de surmonter les contraintes posées par les estimations d'ET issues des données expérimentales qui présentent des lacunes en termes de continuité. Les saisons sont définies comme suit : Printemps (20 mars - 20 juin) ; Été (21 juin - 20 septembre) ; Automne (21 septembre - 20 décembre) et Hiver (21 décembre - 20 mars). Les moyennes interannuelles de l'ET pour ces intervalles ont été analysées.

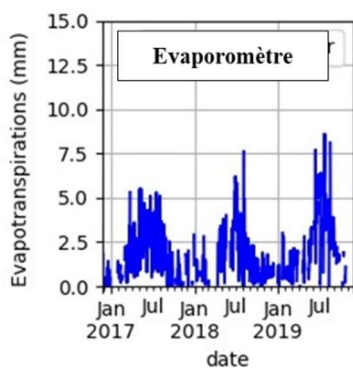
Des choix ont été faits afin d'analyser les résultats de simulations. Les valeurs de KGE supérieures à 0,5 ont été jugées acceptables (Mohsen Hassan Abdalla et al., 2022), retenues et hiérarchisées en fonction du biais. Les cinquante meilleures simulations ont été sélectionnées pour chacune des SfN. Deux types de calages mono-objectifs ont également été retenus : celui effectué avec le débit de drainage pour les toitures végétalisées et avec l'ET pour le jardin de pluie. Cette considération est justifiée par les difficultés du modèle à donner de très bonnes simulations pour une approche multi-objective. Du fait des incertitudes plus importantes qui affectent l'ET estimée sur les toitures végétalisées, le débit de drainage nous a semblé la variable la plus appropriée pour les analyses saisonnières et annuelles des ET simulées.

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Estimation de l'ET à partir d'observations hydrologiques

Les





et Figure 2 illustrent les estimations d'ET issues du bilan hydrologique, respectivement d'une part des lysimètres de jardins de pluie et de l'évaporomètre du MNHN et d'autre part des toitures végétalisées du Cerema à Trappes. Les dynamiques annuelles et saisonnières d'ET y sont représentées pour ces configurations de SfN, avec des valeurs maximales au printemps et en été, et des valeurs faibles pour l'hiver et l'automne.

Sur les 1097 jours d'étude des jardins de pluie (2016 – 2018), l'ET a pu être estimée pour 42 à 56% de ces jours (466 à 616) selon la configuration. Ces données représentent davantage les saisons de printemps et d'été, soit entre 50 et 55% des périodes étudiées. L'ET moyenne journalière est comprise entre 2,6 et 3,3 mm/j pour les dispositifs lysimétriques végétalisés, et est de 2 mm/j pour l'évaporomètre. Le neuvième décile de l'ET journalière est compris entre 5,4 et 6 mm/j pour les lysimètres de jardins de pluie et vaut 4 mm/j pour l'évaporomètre.

Une comparaison des cumuls d'ET sur les jours de mesure communs aux différentes configurations permet d'illustrer l'effet des facteurs testés sur l'évapotranspiration (ET). Pour 375 jours communs, les jardins de pluie avec réserve ont une ET cumulée de 1256 mm, alors que celui sans réserve en eau a un cumul de 983 mm, soit une différence de 28% par rapport lysimètre sans réserve. Le type de végétation testé, entre arbuste et herbacée (379 jours communs), conduit à des cumuls respectifs de 1190 mm et 1223 mm, soit une différence d'environ 33 mm, ce qui n'est pas significatif. Les lysimètres avec végétation herbacée (404 jours communs) et arbustive (481 jours communs), présentent des cumuls d'ET supérieurs respectivement 16 et 22% à celui du lysimètre où la végétation est retirée régulièrement. Cela indique que la présence de végétation constitue un facteur favorable pour l'ET. Lorsque la végétation est spontanée, la différence par rapport à des herbacées (359 jours communs, 1111 mm et 1109 mm respectivement) ou à des arbustes (431 jours communs, soit 1436 et 1301 mm respectivement) reste faible. Enfin, lorsqu'on considère les 185 jours communs des lysimètres et de l'évaporomètre, on observe une différence qui, par rapport à l'évaporation cumulée de l'évaporomètre (409 mm), est de 18% par rapport aux lysimètres sans réserve et entre 50 à 60% par rapport aux autres configurations testées.

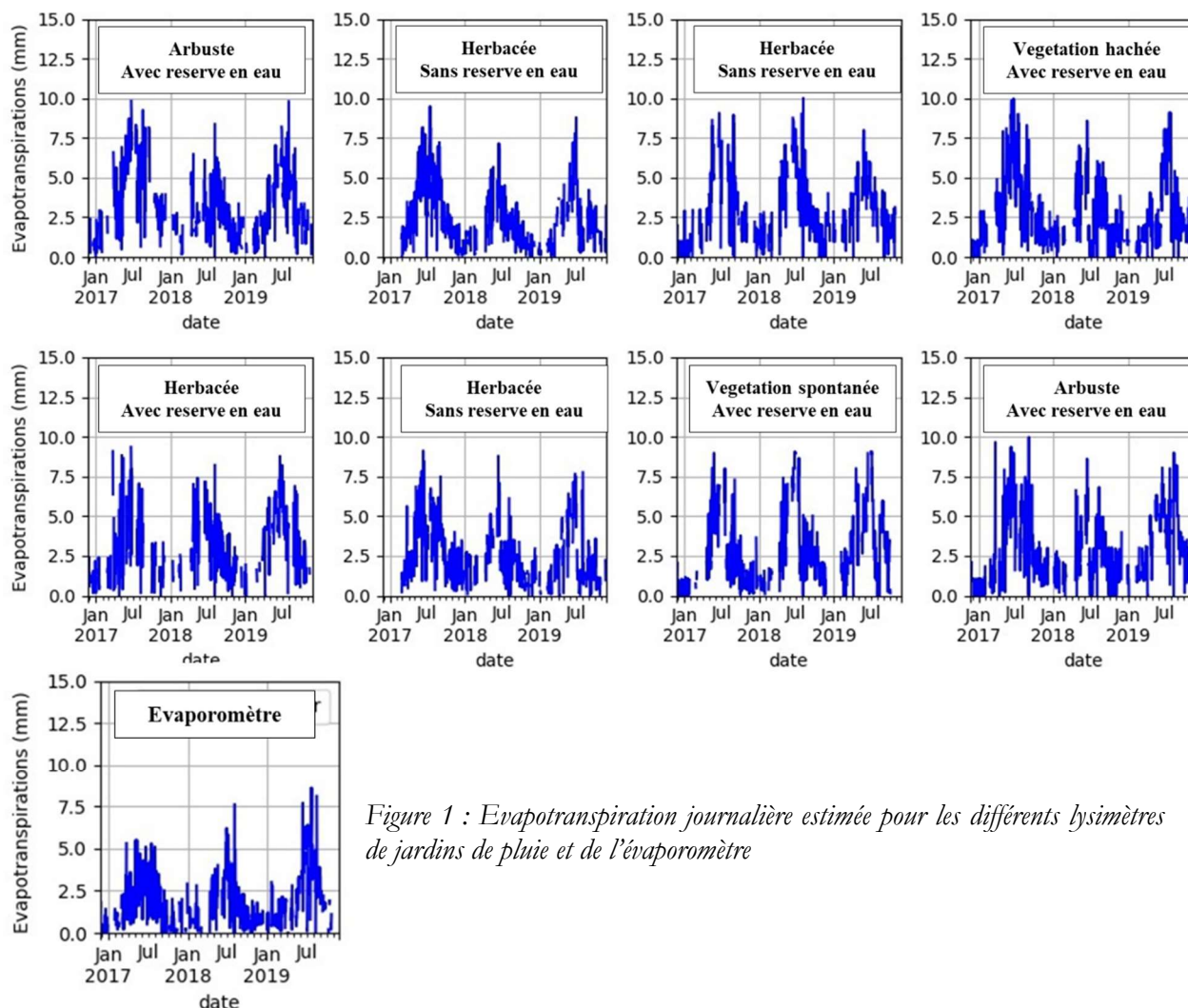


Figure 1 : Evapotranspiration journalière estimée pour les différents lysimètres de jardins de pluie et de l'évaporomètre

Concernant les toitures végétalisées testées, les évapotranspirations journalières estimées sur les six années de données (2011 – 2018), environ 49-55% des jours sans pluie selon la configuration (SE3Y : 55%, SE15Y : 47%, GE15Y : 51%, GI15Y : 49% et NE3Y : 54%) ont été validés et utilisés pour l'estimation. Ces données représentent une part importante de la période estivale (38-42%) et printanière (29-40%), mais sont plus limitées en automne (1-15%) et hiver (12-19%) où les jours sans pluie sont rares. Les valeurs journalières des neuvièmes déciles sont plus faibles que pour les jardins de pluie, variant de 0,8 à 3 mm au printemps-été, et de 0,4 à 0,8 mm en hiver-automne.

Ces estimations d'ET permettent d'illustrer les différences entre les différentes configurations de toitures testées. Le premier facteur est l'épaisseur du substrat, où les différences sont significatives à l'échelle journalière. Les substrats de 3 cm ont une ET inférieure ou égale à 2 mm/j, tandis que ceux de 15 cm présentent des ET inférieures à 6 mm/j. Ces différences s'observent également en cumulant les périodes communes. En comparant les deux substrats, le substrat I, plus organique, entraîne des cumuls d'ET sur les périodes communes 24% plus élevés. De manière cumulative, sur l'ensemble des périodes d'étude, l'ET de la configuration à substrat nu a été plus importante que celle de la configuration végétalisée (+16%).

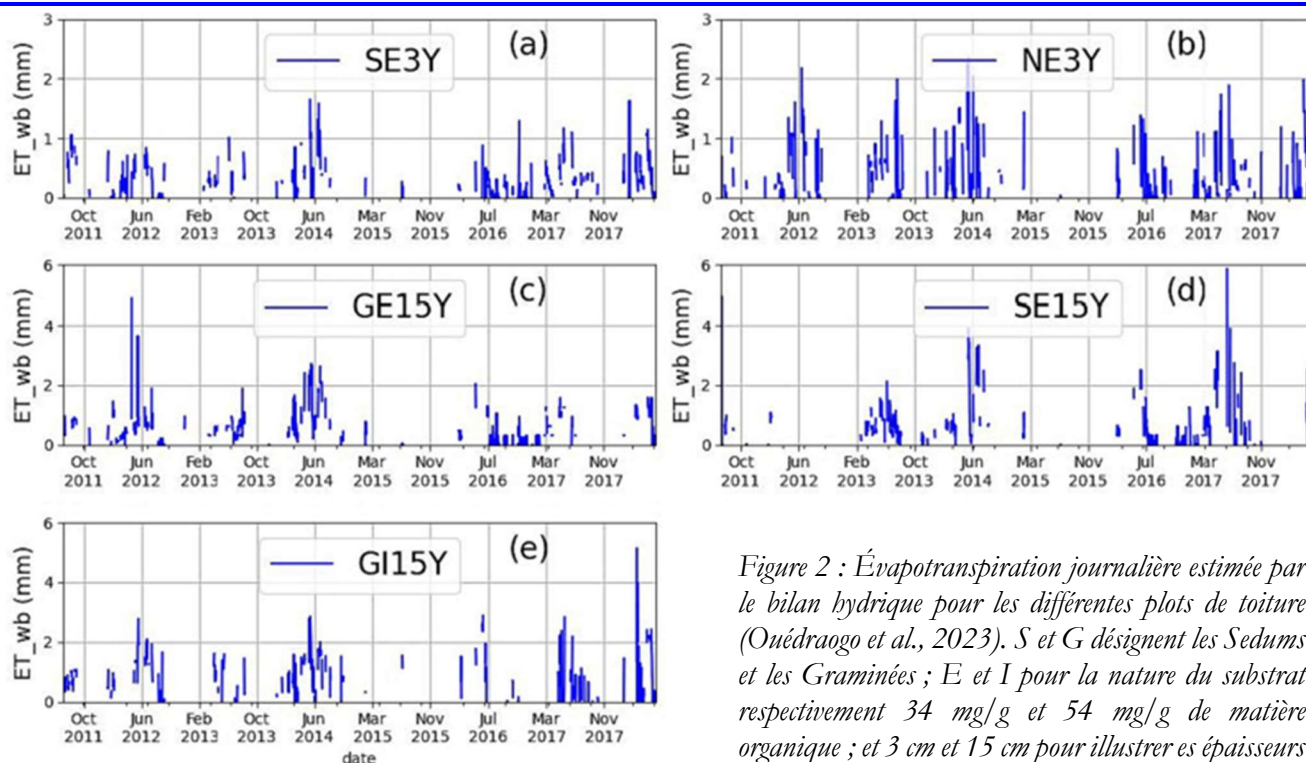


Figure 2 : Évapotranspiration journalière estimée par le bilan hydrique pour les différents plots de toiture (Ouédraogo et al., 2023). S et G désignent les Sedums et les Graminées ; E et I pour la nature du substrat respectivement 34 mg/g et 54 mg/g de matière organique ; et 3 cm et 15 cm pour illustrer les épaisseurs

2. Calage du modèle

Les performances du modèle pour les différentes configurations sont décrites dans le Tableau 2. L'évaluation globale de ces performances, établie sur le KGE et sa composante le biais, met en évidence une diversité dans l'efficacité des simulations parmi les différentes configurations étudiées. Notamment, la configuration NE3Y se distingue par des performances inférieures, illustrées par des valeurs de KGE plus faibles, suggérant des limitations dans la précision de la simulation des processus de drainage. Pour la configuration du jardin de pluie RG80, on observe des valeurs de KGE variant de 0,53 à 0,68 pour l'ET estimée, avec un biais variant de 0,7 et 1,03.

Tableau 1 : Performances des 50 meilleures des simulations sur la période de calage pour les toitures végétalisées (août 2012 – août 2014) et le jardin de pluie (Février 2017 – Février 2018).

Configurations	Variable utilisée pour le calage	Performance du modèle	
		KGE	1 – biais
NE3Y	Débit de drainage	0.52 - 0.57	0.02 – 0.03
SE3Y		0.52 – 0.77	0.11 – 0.18
SE15Y		0.5 – 0.77	0.04 – 0.05
GE15Y		0.5 – 0.79	0.02 – 0.08
RG80	ET estimée	0.53 – 0.68	0.3 – 0.03

Les Figures 4 et 5 illustrent graphiquement la comparaison entre les simulations et les observations sur l'ensemble de la période de calage (fond gris) ainsi que sur toute la période simulée. Sur toutes les configurations et en particulier le compartiment NE3Y (Figures 4b), on constate que le modèle éprouve des difficultés à simuler la teneur en eau du substrat lorsque le processus de calage ne prend en compte que le débit de drainage. Pour le jardin de pluie, le calage avec l'ET donne de bonnes dynamiques, tant pour l'ET simulée que pour le débit de drainage simulé. Cependant, en termes de biais, l'ET simulée a tendance à sous-estimer l'ET estimée, avec des critères de biais pouvant être limités à 0,7.

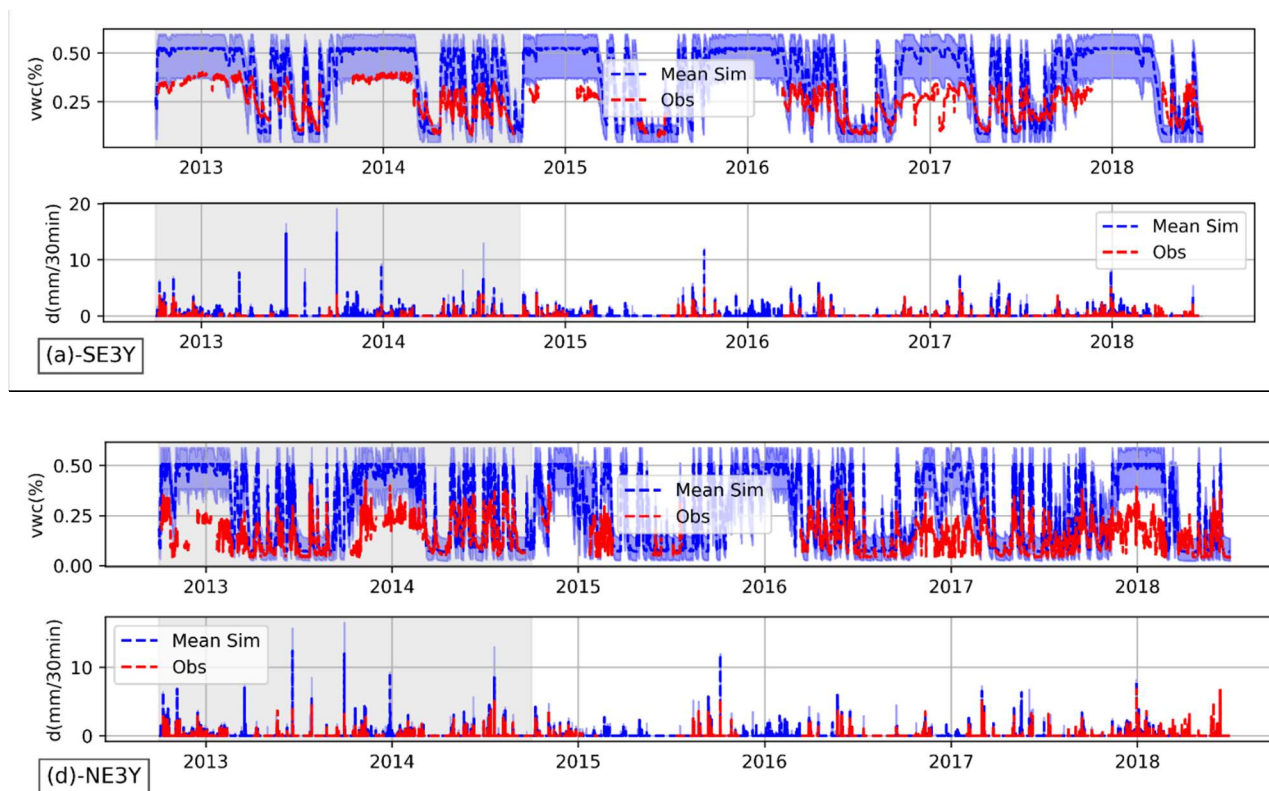


Figure 3 : Simulation et observation des variables de drainage (d) et de teneur en eau (vwc) pour les compartiments de la toiture végétalisée : a-SE3Y (Sedums, 3 cm), b-SE15Y (Sedums, 15 cm), c-GE15Y (Graminées, 15 cm), d-NE3Y (substrat nu, 3 cm) (les zones en bleu clair correspondent au faisceau des 50 meilleurs simulations).

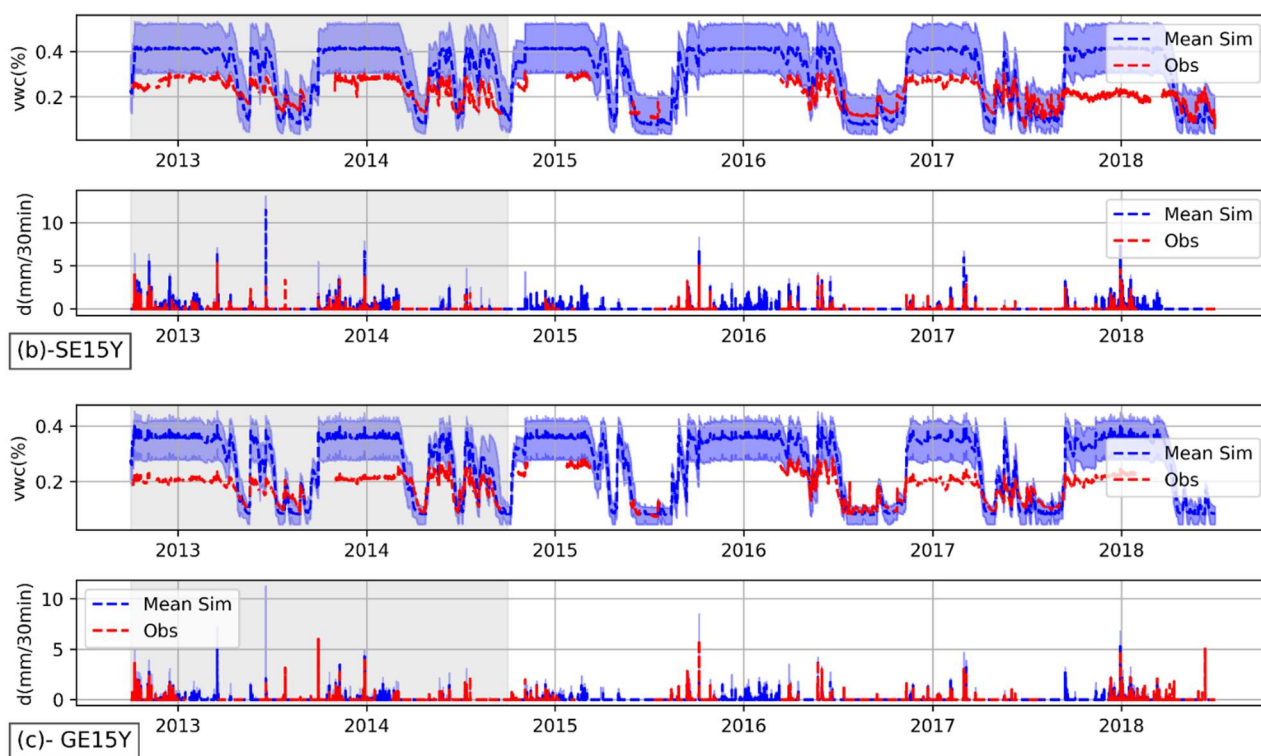


Figure 4 : Simulation et observation des variables de drainage et de teneur en eau pour les compartiments de la toiture végétalisée : a-SE3Y (Sedums, 3 cm), b-SE15Y (Sedums, 15 cm), c-GE15Y (Graminées, 15 cm), d-NE3Y (substrat nu, 3 cm) (les zones ombragées en bleu clair correspondent au faisceau des 50 meilleurs simulations).

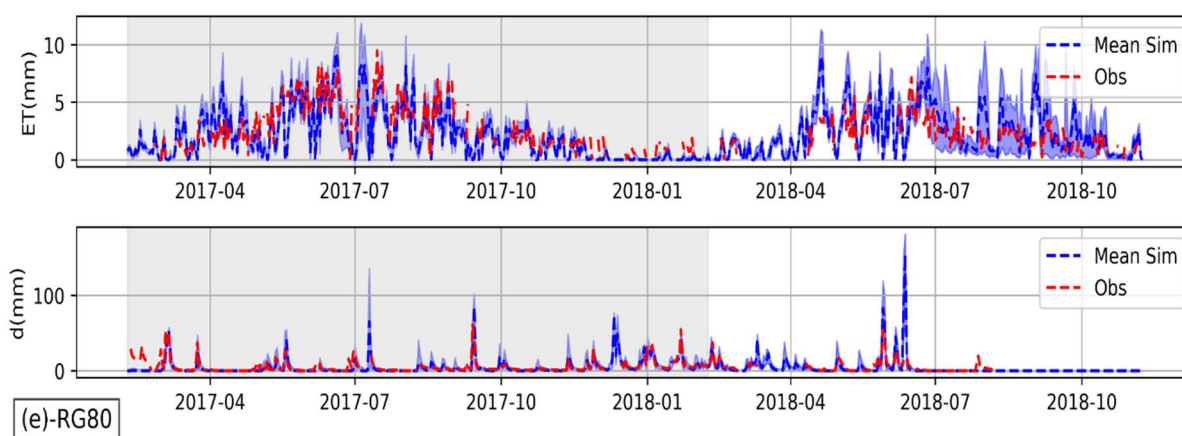


Figure 5 : Simulation et observation des variables de drainage (d , mm / 30 min) et d'évapotranspiration (ET , mm pour 1j) observées et simulées pour la configuration de jardins de pluie (Février 2017 – November 2018).

3. Simulation de l'évapotranspiration saisonnière

L'analyse des variations saisonnières de l'ET (en % des précipitations) pour les configurations de toitures végétalisées GE15Y, SE15Y, SE3Y, et NE3Y révèle des tendances distinctes (Figure 7). Au printemps, les taux d'ET atteignent 72% de la pluviométrie pour GE15Y et SE15Y, tandis que l'été est marqué par des ET surpassant 79% pour ces mêmes configurations. En automne, une baisse notable de l'ET est observée, avec des taux allant de 20% à 34% selon la configuration. L'hiver, avec les plus faibles taux d'ET observés durant l'année (de 15% à 36% de la pluviométrie), illustre le ralentissement de l'activité de la végétation en réponse aux basses températures. Cette saison met en lumière les défis associés à la gestion à la source des eaux pluviales urbaine dans des conditions climatiques moins favorables.

Les bilans hydrologiques simulés pour le jardin de pluie RG80, dont l'impluvium est égal à quatre fois la surface du jardin, permettent aussi d'effectuer une analyse spécifique de ses performances en termes d'ET à travers les saisons (Figure 7). Au printemps, l'ET représente 41% des apports de précipitations (338 mm d'ET sur 824 mm d'apports de pluie). En été, l'ET atteint 55% des apports de précipitations (333 mm d'ET sur 606 mm de pluie), cette saison présentant la plus haute proportion d'ET pour RG80.

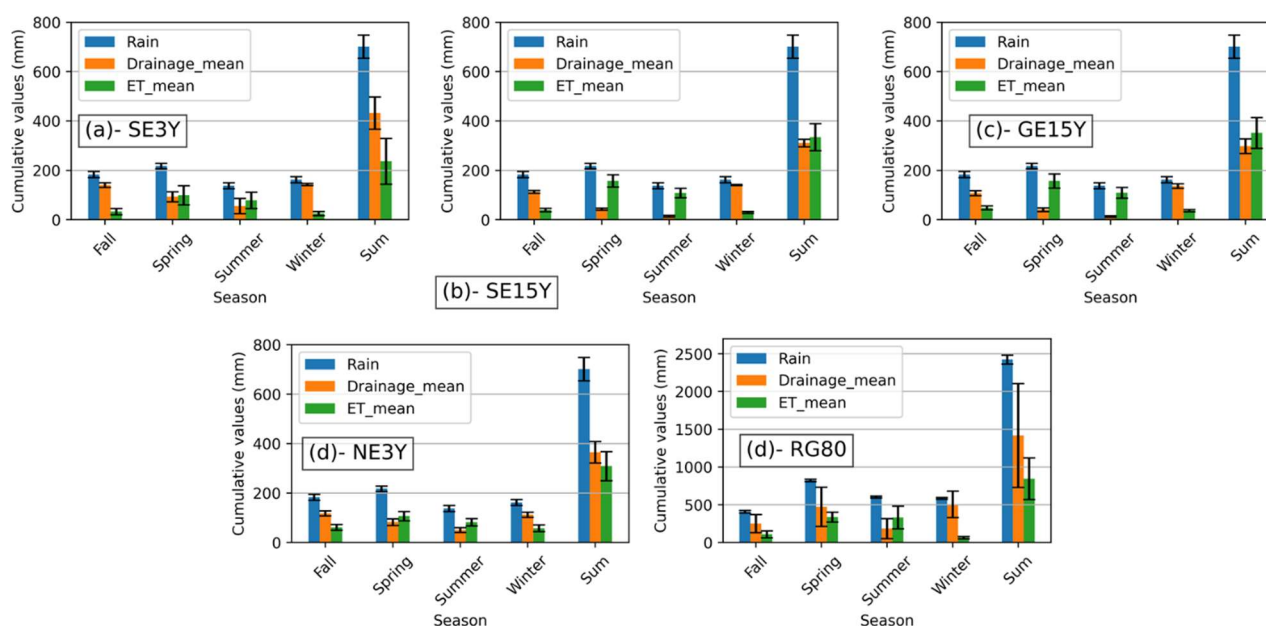


Figure 6 : Analyse saisonnières et annuelles des variables du bilan hydrologique des quatre compartiments des toitures végétalisées (août 2012 à août 2018) et du jardin de pluie (de février 2017 à juillet 2018). Les intervalles (en noir) représentent les moyennes des écarts-types interannuels de l'ensemble des simulations. Pour la pluie, c'est l'incertitude calculée selon la méthode de propagation.

4. Simulation de l'évapotranspiration annuelle

La Figure 7 illustre aussi les bilans hydrologiques à l'échelle interannuelle des différentes SfN testées. L'analyse des résultats obtenus révèle des tendances significatives en termes de précipitations et d'ET. Pour les toitures végétalisées, la configuration GE15Y a présenté une moyenne annuelle de 352 mm/an d'ET pour une précipitation annuelle de 701 mm/an, illustrant une capacité modérée (50%) d'évacuation de l'eau par ET. Les autres compartiments (SE15Y, SE3Y, NE3Y) ont des capacités d'ET variables, avec SE3Y affichant une ET annuelle faible (237 mm/an, 34%). Les configurations SE15Y et NE3Y ont des ET interannuelles moyennes de 354 mm/an et 309 mm/an, soit 50% et 44% de la pluie respectivement.

Le jardin de pluie RG80 se distingue par un bilan en eau différent, avec un volume de drainage plutôt élevé (1419 mm, pour un apport par précipitation de 2425 mm sur la période de février 2017 à juillet 2018, soit 58%) par rapport aux toitures végétalisées. Ce résultat est à mettre en lien avec la plus grande surface d'impluvium (4x la surface du jardin) que dans le cas des toitures végétalisées. Il indique un poids prépondérant de l'exfiltration vers le sous-sol (ou le drainage vers le réseau) des eaux pluviales, avec une ET totale de 847 mm, soit 35% de l'apport pluvial.

5. Discussion

Le principal élément pouvant affecter les estimations par bilan hydrologique des ET issues de ces SfN est la variation de stock d'eau. En effet, les mesures de la masse des dispositifs permettant d'accéder à cette variation du stock d'eau dans les jardins de pluie sont fiables à des pas de temps journaliers. Cependant, les mesures de teneur en eau dans les substrats de toitures végétalisées, substrats plus grossiers sont plus incertaines (Fardel, 2019; Kanso, 2004), ce qui a des répercussions sur les ET estimées par cette méthode. L'autre difficulté avec cette méthode notamment pour les toitures végétalisées vient de ce qu'il faut considérer uniquement les périodes sèches où aucune pluie n'advient pour estimer le flux. La méthode du bilan en eau, s'avère moins efficace pendant et, immédiatement après les événements de pluie (l'ET est surestimée). Cela est dû principalement à la difficulté d'évaluer tous les stocks d'eaux durant ses périodes, particulièrement sur les toitures végétalisées où l'eau stockée sur les étanchéités (flaques d'eau dues à une planéité imparfaite) n'est pas considérée dans les bilans.

Dans ce travail, un des éléments importants à discuter est l'effet du type de végétation sur les ET estimées. Cet effet n'a pas été clairement établi, que ce soit pour les jardins de pluie (arbustes vs herbacées) ou pour les toitures végétalisées (sedums vs graminées). Sur les jardins de pluie, la différence d'ET entre arbustes et herbacées pour des lysimètres proches n'a pas révélé de différence significative. Cependant, les lysimètres répliques des arbustes ont montré des différences de +12% (1584 mm vs 1414 mm, pour 466 jours communs), probablement en raison de l'ombrage impactant l'un d'entre eux. D'autres études de la littérature, comme celle de Nocco et al. (2016), ont montré que l'effet du type de végétation est significatif lorsque la demande évaporative est élevée. Ils ont ainsi observé que la prairie a présenté une ET plus élevée que les autres types de végétation (9 et 7 mm/j en août et juillet), le sol nu ayant la plus faible ET (4 et 3 mm/j), et les arbustes maintenant une ET constante de 6 mm/j.

Concernant les toitures végétalisées testées dans cette étude, notons que les graminées n'ont pas résisté aux périodes de stress hydrique, contrairement aux sedums plus résistants. Sur une longue période (2011-2018), les sedums ont une ET estimée cumulée totale de 9% supérieure par rapport aux graminées, ce qui n'est pas significatif. Dans l'hypothèse où les épisodes de sécheresse sont limités (par exemple, par irrigation) sur les toitures végétalisées, les graminées pourraient avoir une plus grande capacité d'ET. Des études de la littérature ont montré des différences d'ET entre types de végétation sur toitures végétalisées. Kemp et al., (2019) ont observé que des graminées comme *Stachys* et *Salvia* avec un substrat riche en matière organique (75%) et une capacité de rétention en eau élevée (60%) évaporent davantage (72% de rétention due à l'ET) que les sedums (46%). Dans les mêmes conditions climatiques du Royaume Unie, Poë et al., (2015) n'avaient pas trouvé de différences significatives d'ET entre sedums et fleurs de prairie, avec un substrat peu organique (2,3-3,8%) et une faible capacité de rétention (35-41%).

En ce qui concerne la simulation de l'ET des SfN à partir de modèle hydrologique, la prise en compte des cumuls d'ET simulés des SfN à des échelles saisonnières ou annuelles nécessite une considération des calibrations effectuées durant la période de calage du modèle. Ainsi, la calibration du modèle,

notamment pour SE3Y dans notre étude, entre les débits de drainage simulés et observés, révèle un biais moyen de 15%. À l'échelle annuelle, une surestimation du drainage mène à une sous-estimation de l'ET, résultant ainsi en une réestimation de l'ET entre 40 à 49% de la précipitation totale annuelle pour le compartiment SE3Y plus proche des performances du compartiment NE3Y. Au-delà des écarts observés pour les différents compartiments du fait de biais importants, l'impact des conditions météorologiques locales sur leur performance est questionnable. Dans un contexte urbain, où la variabilité locale des facteurs atmosphériques est considérable (DiGiovanni et al., 2013b; DiGiovanni-White et al., 2018), cette dimension peut prendre une importance particulière et il y aurait un sens d'étudier l'impact des variations microclimatiques sur les ETP et les performances des SfN.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

1. Conclusion

Dans cette étude, l'ET a été estimée par la méthode de bilan hydrologique pour différentes configurations de toitures végétalisées et de jardins de pluie expérimentaux. Les estimations basées sur les dispositifs de lysimètres des jardins de pluie ont une meilleure fiabilité à des pas de temps journaliers (0 – 10 mm/j). Les résultats des estimations d'ET dans ces ouvrages indiquent aussi une saisonnalité marquée, avec des valeurs faibles en hiver et en automne (<2-3 mm par jour) et élevées en été et au printemps (8 – 10 mm par jour pour les valeurs maximales). Selon le lysimètre, les dispositifs de jardins de pluie testés présentent un neuvième décile d'ET journalière compris entre 5,4 et 6,5 mm/j. Quant aux toitures végétalisées, selon les configurations testées, on a les neuvièmes déciles entre 0,8 et 3 mm/j.

La capacité de rétention d'eau dans la structure, que ce soit uniquement dans le substrat (cas des toitures végétalisées étudiées ici) ou également à la base du dispositif (réservoir d'eau interne comme dans certains jardins de pluie), est le facteur le plus déterminant pour l'ET de ces SfN. Le rôle de cette capacité de rétention devrait s'accroître sous climats futurs, du fait de périodes de sécheresse plus fréquentes et plus sévères, augmentant l'intérêt de couches de stockage dédiées. L'évaluation de l'effet du type de végétation dans ces solutions suggère que ce n'est pas le facteur le plus déterminant, mais que dans certaines conditions favorables (substrats plus organiques et retenant plus d'eau), d'autres espèces plutôt que les Sedums (sur les des toitures végétalisées) couramment utilisées peuvent favoriser une ET plus élevée et sont à encourager dans l'ingénierie.

Le modèle HYDRUS 1D a été paramétré pour simuler l'ET d'une diversité de configurations de toitures végétalisées ainsi que pour une configuration de jardins de pluie sans réserve d'eau interne. La simulation de l'ET sur de longues périodes (toitures végétalisées : 2012-2018 et jardins de pluie : 2017 - 2018) a permis d'effectuer des analyses quantitatives d'ET saisonnière et annuelle de ces dispositifs. Pour les dispositifs de toitures végétalisées (SfN dont la surface végétalisée est égale à la surface d'impluvium) avec un substrat de 15 cm (graminées et sédums), le bilan interannuel montre une ET supérieure à 50 % de la pluie, tandis que les autres configurations avec 3 cm (sédums ou substrat nu) ou le jardin de pluie (SfN avec une surface végétalisée égale à 25% de l'impluvium, épaisseur de substrat de 80 cm et couverture herbacée) affichent des pourcentages de l'ordre de 30 à 44 % de la pluie collectée. En termes d'analyse saisonnière, au printemps et en été, les taux d'ET sont élevés pour toutes les configurations (52 – 76%). L'automne, une baisse significative est observée avec des taux d'ET allant de 20% à 34%, tandis qu'en hiver, les taux sont les plus bas de l'année, variant de 15% à 36%. Le jardin de pluie RG80 affiche des taux d'ET de 48% au printemps, 58% en été, 30% en automne et seulement 13% en hiver par rapport aux apports de précipitations.

2. Perspectives opérationnelles

À l'échelle annuelle, l'ET joue un rôle important dans la réduction du ruissellement urbain, et contribue à la gestion à la source des pluies courantes. Dans les SfN étudiées dans ce travail (jardins de pluie étanche avec une éventuelle réserve en eau interne et toitures végétalisées extensives), où l'ET constitue le seul processus de réduction du drainage des eaux de pluie, on peut anticiper une ET annuelle entre 30% et 50% des apports annuels de pluie pour le climat francilien. Dans le cas où l'abattement des eaux de pluie

ne se fait que par évapotranspiration, l'optimisation de l'ET dans ces structures va dépendre de plusieurs facteurs :

- i) la surface évaporative, prévoir des ouvrages très extensifs avec des ratios des surfaces d'impluvium (surfaces imperméables) sur surfaces évaporatives de l'ouvrage les plus faibles possibles ;
- ii) la disponibilité en eau dans le système pour soutenir le flux d'ET : cela nécessite la mise en place d'une réserve d'eau au sein du dispositif capable de stocker temporairement les eaux de pluie ou d'être alimentée par d'autres systèmes d'apport des eaux pluviales. Bien que la suggestion d'un stockage souterrain présente un intérêt hydrologique (surtout dans des zones sensibles à l'infiltration de l'eau dans le sous-sol), il convient de souligner que cela peut poser des questions d'impact environnemental. Il faudrait donc imaginer des systèmes plus rustiques (sans apports de matériaux synthétiques ou béton), jouant par exemple sur les propriétés hydrodynamiques de la couche de sol ou de substrat.
- iii) le troisième facteur limitant est lié à l'écophysiologie de la végétation et sa capacité à évapotranspirer dans les conditions du site. Si le type de végétation a été identifié comme un facteur secondaire dans ce travail, sa présence, même spontanée, est recommandée car son rôle devient significatif lorsque la capacité de rétention est suffisante, contribuant ainsi à augmenter l'ET.

Pour la prise en compte de l'ET dans la conception des SfN, une prédiction des apports de précipitations mobilisables par l'ET nécessite des outils de modélisation opérationnels adaptés aux SfN dédiées à la gestion à la source des eaux pluviales. Lorsque le dispositif est pourvu d'une réserve d'eau, il est envisageable de considérer que l'ET est principalement limitée par la demande atmosphérique, et un dimensionnement basé sur une ETP peut paraître acceptable. L'évaluation de l'ETP à l'aide d'une formulation telle que le modèle de Penman-Monteith (avec paramétrisation du type FAO-56 ou Météo-France) est préférable à d'autres formulations d'ETP plus simplistes. En revanche, lorsque le système ne dispose pas de réserve d'eau interne, il est recommandé de réaliser des simulations continues d'ET. Dans ce cas, il peut être suffisant de se référer à des données bibliographiques pour les paramètres du substrat et l'ETP de la station météorologique la plus proche.

VALORISATION

Ouédraogo, A.A. Evapotranspiration issue de solutions fondées sur la nature pour la gestion à la source des eaux pluviales urbaines : analyse à partir d'observations et de modélisation hydrologiques. Thèse de doctorat, École des Ponts ParisTech, **2025**. 260 pages.

Ouédraogo, A.A., Berthier, E., Durand, B., Gromaire, M.-C., 2022. Determinants of Evapotranspiration in Urban Rain Gardens: A Case Study with Lysimeters under Temperate Climate. *Hydrology* 9, 42. <https://doi.org/10.3390/hydrology9030042>

Ouédraogo, A.A., Berthier, E., Ramier, D., Tan, Y., Gromaire, M.-C., 2023. Quantifying evapotranspiration fluxes on green roofs: A comparative analysis of observational methods. *Sci. Total Environ.* 166135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166135>

CONTACTS

Marie-Christine GROMAIRE, marie-christine.gromaire@enpc.fr
Emmanuel BERTHIER, emmanuel.Berthier@cerema.fr
Ahmeda OUEDRAOGO, ahmeda.ouedraogo@cerema.fr