

Evapotranspiration (ET) issue de toitures végétalisées extensives : observations et modélisations hydrologiques

Ahmeda OUEDRAOGO
Emmanuel BERTHIER (TEAM, Cerema)
Marie-Christine GROMAIRE (LEESU, ENPC)

1. Contexte de l'étude



Jet dû à une saturation d'un réseau d'eau pluviale



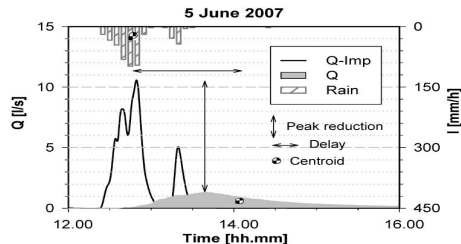
Pollution de la Seine due au débordement du réseau d'égouts

Gestion durable des eaux pluviales urbaines

☐ des solutions conventionnels (Les collecteurs, les réservoirs de stockage, les étangs, etc...)

☐ des solutions fondées sur la nature à travers des OGS (Les noues, les toitures végétalisées, les jardins de pluie, les arbres de pluie, etc...)

Favorise l'infiltration et l'évapotranspiration



Impact hydrologique d'une toiture végétalisée sur l'hydrogramme pour une étude de cas en Italie (Palla et al., 2010) : le débit grisé représente la réponse de la toiture végétalisée, par rapport à celle d'un bâtiment classique imperméabilisé

le rôle du processus d'ET:

- Abattement des évènements pluvieux courants
- Questions de rafraîchissement local
- Pérennité de la végétation

Objectifs :

- Estimations et déterminants de l'ET sur un OGS
- Cas d'étude de simulation de l'ET d'un OGS avec un modèle hydrologique



(Source : <https://ecolo-house.com/fr/les-toits-vegetalises/>)

2. Site d'étude

Une toiture végétalisée expérimentale

Elle est située sur le site du Cerema en Île-de-France à Trappes

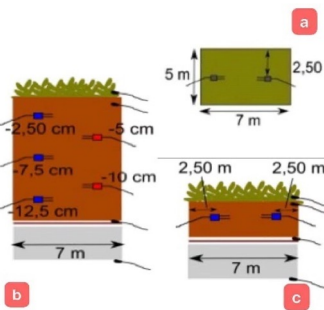


❑ Vue de la Toiture végétalisée

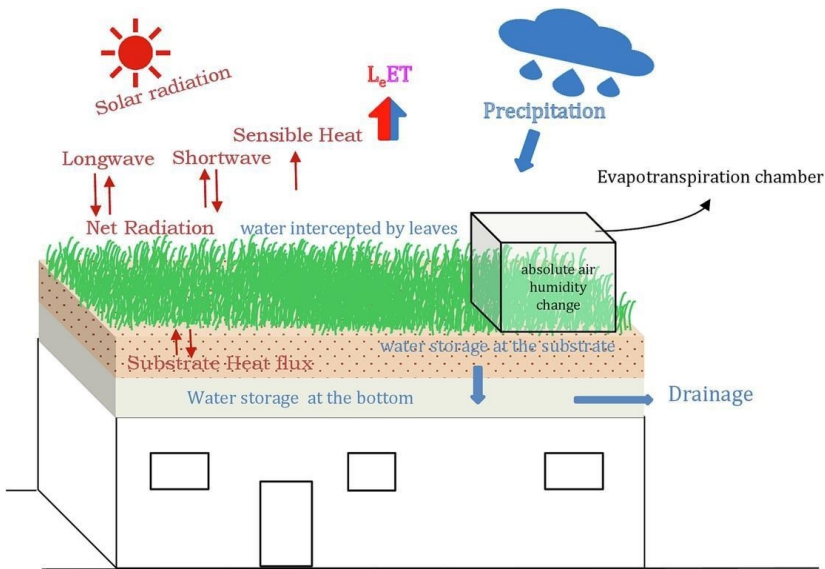


❑ Différentes configurations de toiture végétalisée de 35 m²

- **SE3Y** : Sedum, Extensive, 3 cm, polystyrène expansée
- **SE3Z** : Sedum, Extensive, 3 cm, pouzzolane
- **SE15Y** : Sedum, Extensive, 15 cm, Polystyrène expansée
- **GI15Y** : Graminées, Intensive, 15 cm, Polystyrène expansée
- **GE15Y** : Graminées, Extensive, 15 cm, Polystyrène expansée
- **NE3Y** : Nu, Extensive, 3 cm, Polystyrène expansée



2. Méthodes d'estimation de l'ET



Evapotranspiration (ET) Processes on a Green Roof: **Water Balance**, **Energy Balance**, and an evapotranspiration Chamber

1. Bilan hydrologique

$$ET = P - R - \Delta \theta \text{ (mm)}$$

$$\theta (\%) = \frac{\sum V_i \theta_i}{\sum V_i}$$

avec θ_i la teneur en eau mesurée par le capteur i . V_i volume représentative du capteur i

2. Bilan d'énergie

$$ET = R_n - G - H \text{ (w/m}^2\text{)}$$

3. Chambre à ET

$$ET = 10^{-3} L_e h_{ch} \frac{\Delta \rho_v}{\Delta t} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}$$

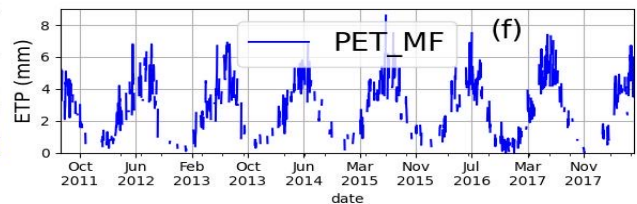
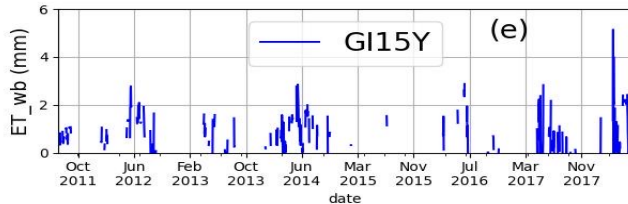
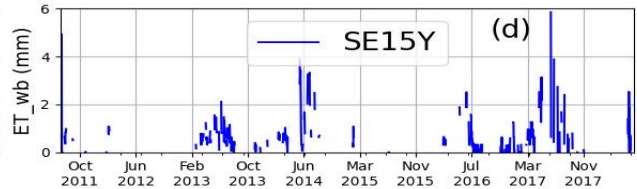
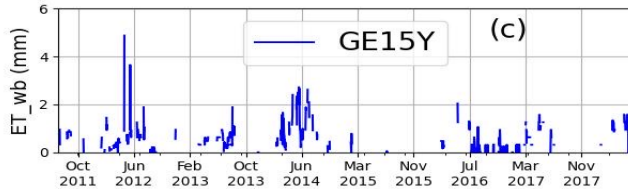
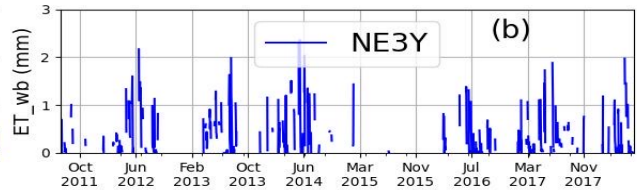
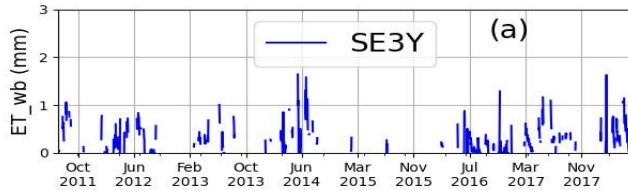
□ Mesures entre Juin 2011 à Août 2018

- Teneur en eau dans le substrat de la toiture
- Températures de surface
- conditions atmosphériques (T°C air, Vitesse du vent, Rayonnement net Humidité de l'air , pression de vapeur , Albédo, etc.)

3. Résultats des ET estimées

ET estimée par bilan hydrologique

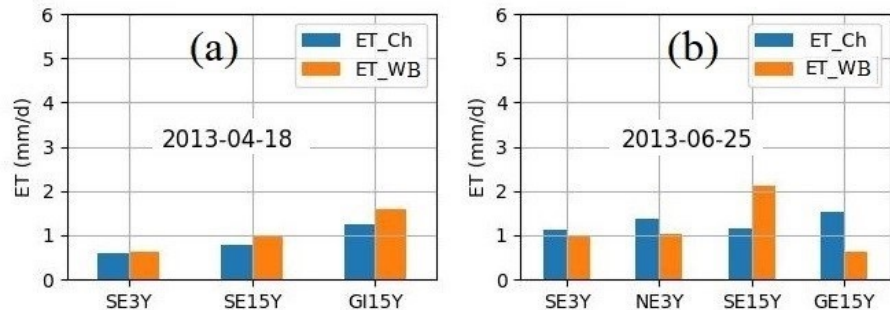
au pas de temps journalier



- Dynamiques saisonnières
- ET estimées entre 0,8 mm et 3 mm au printemps et en été, de 0,4 mm à 0,8 mm en hiver et en automne.
- ET évaluées sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle (PET_MF) de Météo-France.

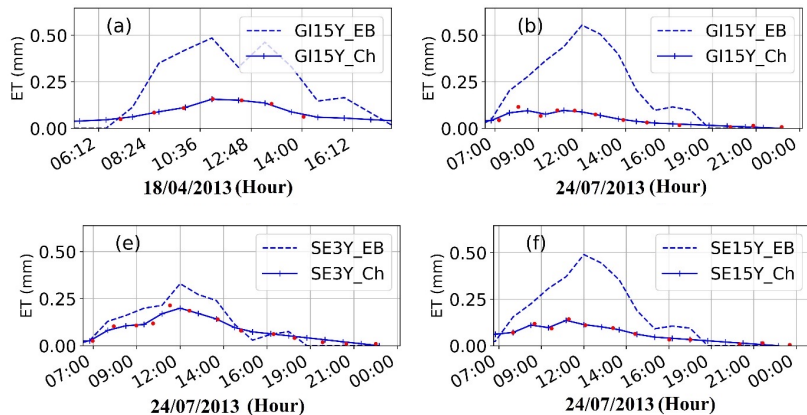
3. Résultats d'ET estimées

❑ Différentes méthodes d'estimations: Chambre (Ch) vs Bilan hydrologique (WB)



- les mesures d'ET des méthodes WB et Ch sont dans le même ordre de grandeur.
- Les ETs par WB présente des valeurs d'ET plus élevées pour les configurations SE15Y (25 juin 2013) et GI15Y (25 juin 2014).

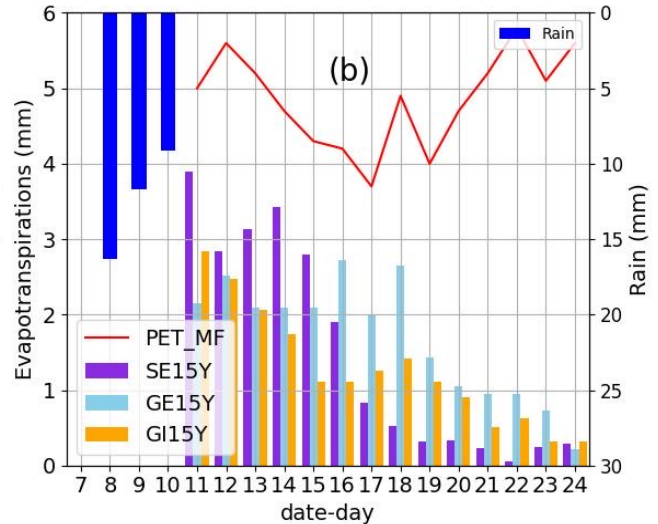
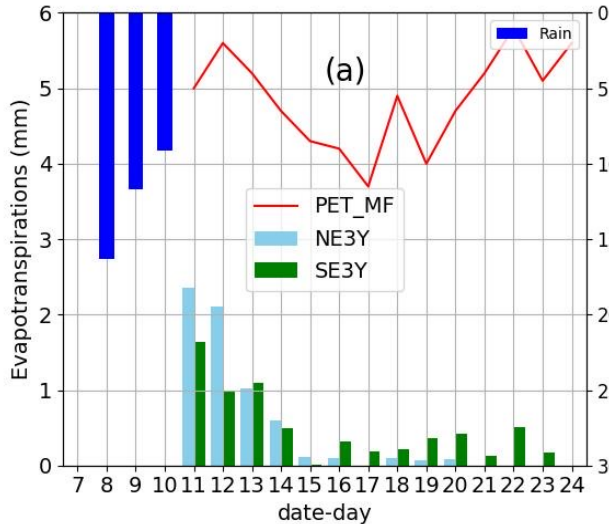
❑ Différentes méthodes d'estimations: Bilan d'énergie (EB) vs Chambre (Ch)



- Les valeurs d'ET d'EB sont de 1,6 à 3 fois plus élevées que celles de Ch le 18 avril et le 24 juillet 2013, atteignant un pic entre 11h et 13h TU.
- Malgré ces variations, les deux méthodes montrent des corrélations solides, avec des coefficients compris entre 0,78 et 0,96.

3. Résultats d'ET estimées

□ Déterminants de l'ET



Évapotranspiration journalières des différents compartiments après un événement pluvieux estimée par le bilan hydrologique (du 11 au 24 juin 2014)

- Épaisseur du substrat cruciale pour ET dans toitures
- Graminées ont ET plus élevée que Sédums
- Substrats plus minces (3 cm), végétation n'impacte pas ET
- Observations à long terme favorisent sédums par rapport aux graminées (pas illustrée).

2. ET à partir des modèles hydrologiques

- **Divers outils de modélisation pour les OGS:**

- Sur 10 études de modélisation récentes entre 2011 à 2021, 50% (Hydrus), 20% (SWMM), 20% (DRAINMOD) -> (Yu et al.2023)
- Dans la communauté scientifique: URBS, MARIE, OASIS, FAVEUR, SWMM-EVA, etc...

- **Concept d'ET potentielle dans ces modèles** : approches physiques (Monteith, 1965; Priestley and Taylor, 1972; Allen et al., 1998), or plus simple utilisant peu d'information (Thorntwaite, 1948; Hargreaves and Allen, 2003; Oudin et al., 2006)

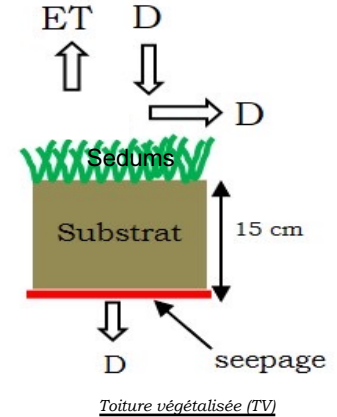
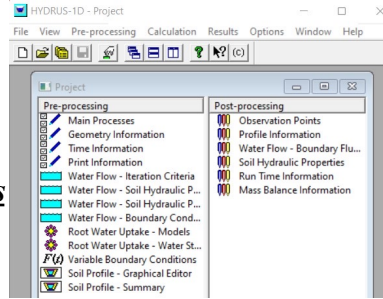
- **ET réelle simulée par les modèles**

- ETP limitée par une fonctions de réduction liées à la disponibilité de l'eau (GIF-mod selon Massoudieh et al., 2017; Aquacycle selon Mitchell et al., 2001)
- ETP limitée par des fonctions de stress hydrique (Feddes (1978) et/ou Jarvy (1987)) reflétant l'absorption d'eau par les racines (UHE, URBS, MARIE, Hydrus)

2. ET à partir des modèles hydrologiques

2.1. Le modèle : Hydrus

- Un modèle paramétré: 16-18 paramètres
- Écoulement de l'eau dans le substrat :



$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = \frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} - S(z, t)$$

$\theta_r \text{ (mm}^3\text{mm}^{-3}\text{)}, \alpha \text{ (mm}^{-1}\text{)}, n(-), K_s \text{ (mm/min)}$

- Schema de l'évapotranspiration dans le Modèle:

1. Penman-Monteith :
$$ET_p \text{ (mm)} = \frac{1}{L_e} \frac{\Delta(Q^* - Q_G) + \frac{\rho_a C_p}{r_a} \gamma (e_s^* - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

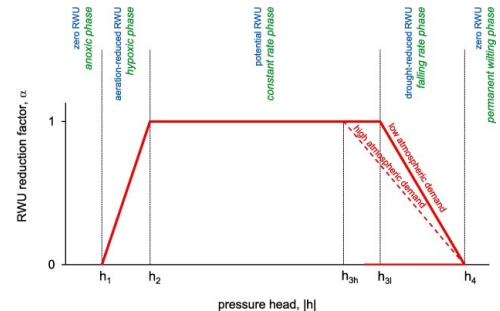
$$r_a = f(u, h_{veg})$$

2. Partition de ET_p

$$\begin{cases} T_p = ET_p (1 - e^{-k^*LAI}) \\ E_p = ET_p e^{-k^*LAI} \end{cases}$$

3. Fonction d'absorption (de stress)

$$S(z, t) = \beta(z)\alpha(h)T_p$$



$\beta(z)$: une fonction de la densité des racines normalisées en m^{-1}

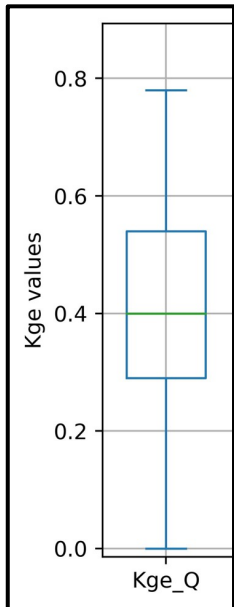
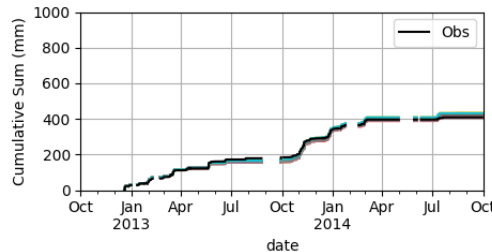
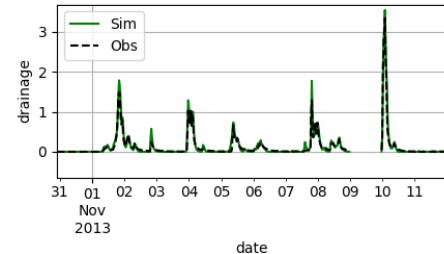
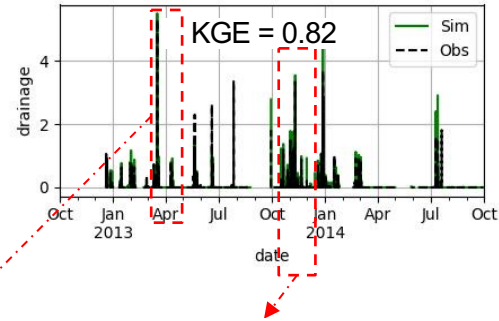
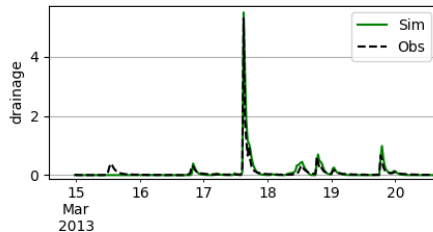
2. ET à partir des modèles hydrologiques

2.2. Evaluation du modèle

- Toiture végétalisée: substrat extensive, 15 cm, Sedums
- Critère d'évaluation:

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

- Le Drainage



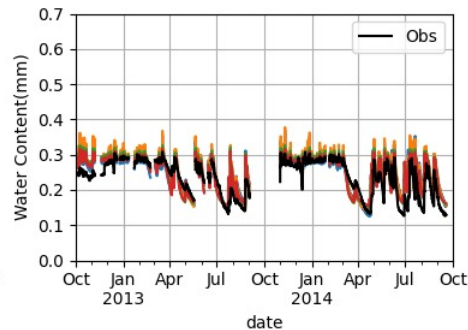
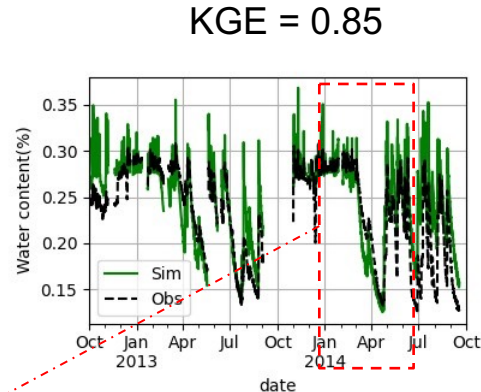
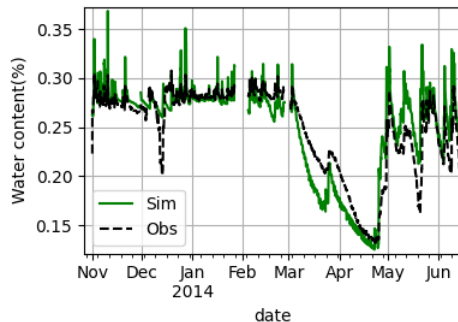
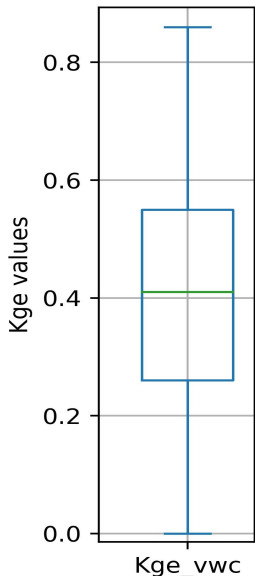
2. ET à partir des modèles hydrologiques

2.2. Evaluation du modèle

- Toiture végétalisée: substrat extensive, 15 cm, Sedums
- Critère d'évaluation:

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

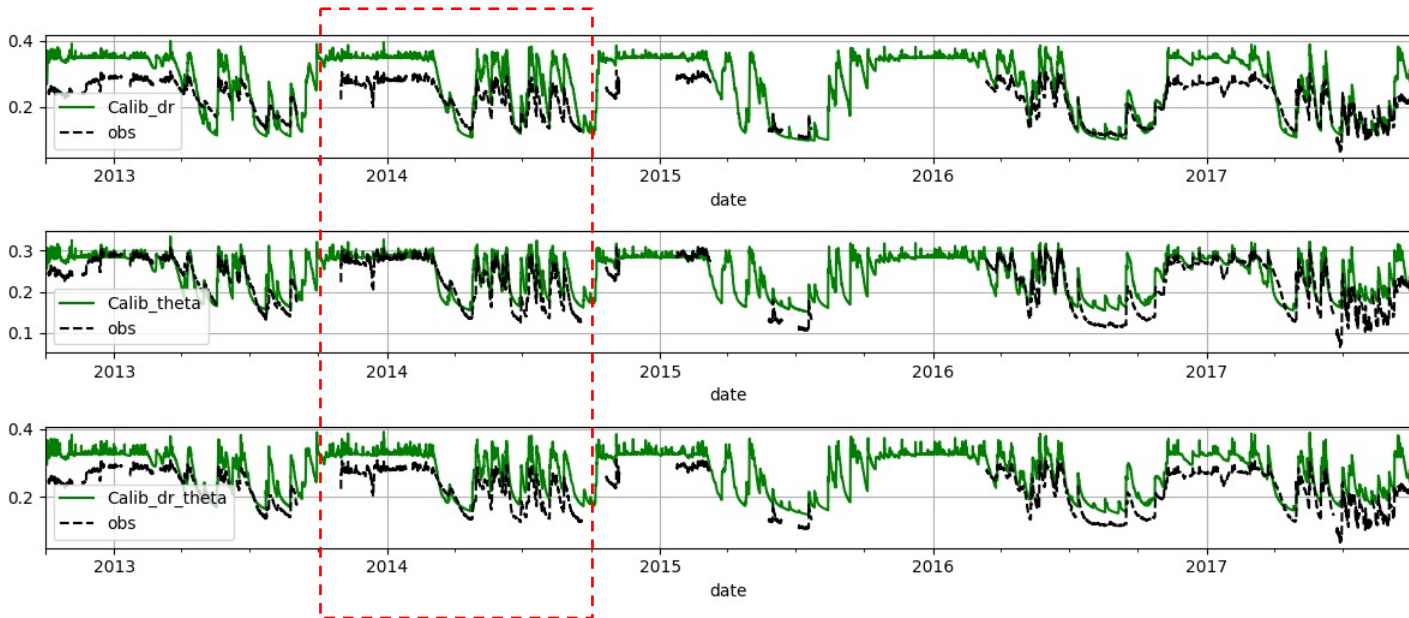
- La teneur en eau moyenne dans le substrat



2. ET à partir des modèles hydrologiques

2.3. Application du modèle

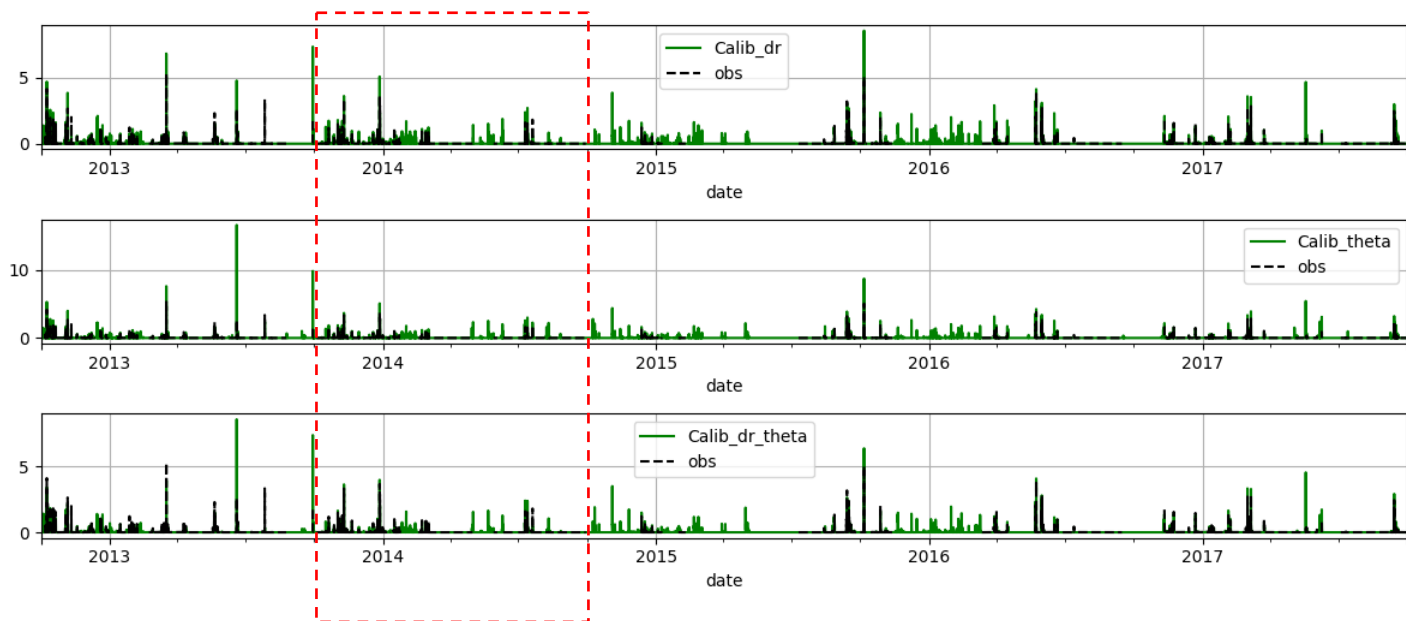
- Simulation de la teneur en eau de 2012 à 2017 pour les trois méthodes de calage du modèle : dr, theta et dr/theta.
- Globalement, la teneur en eau moyenne du substrat est détériorée (valeurs plus faibles) pour les calages impliquant le drainage.



2. ET à partir des modèles hydrologiques

2.3. Application du modèle

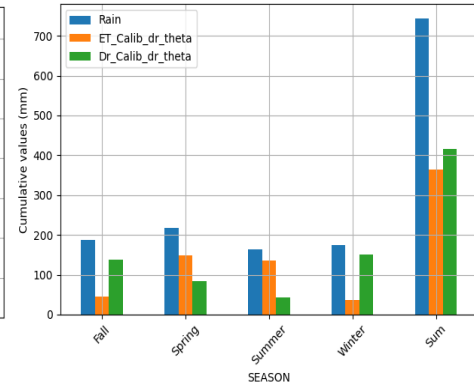
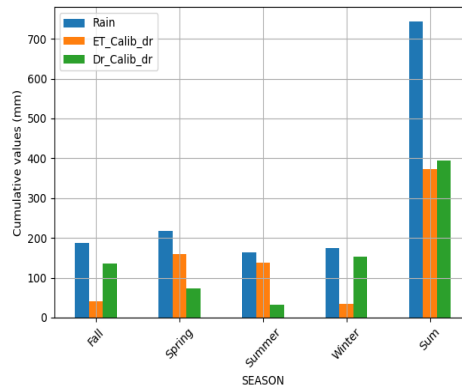
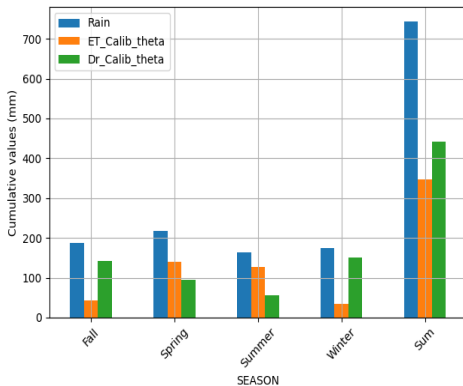
- Simulation du drainage de 2012 à 2017 pour les trois variables de calage du modèle : dr, theta et dr/theta.
- Globalement, les simulations de drainage sont acceptables en termes de KGE.
- Une surestimation des simulations par rapport aux observations.



2. ET à partir des modèles hydrologiques

2.4. Bilan hydrologique

- Toiture végétalisée: substrat extensive, 15 cm, Sedums



- L'ET interannuel (moyenne entre 2012-2017) représente respectivement entre 43 et 49 % de la pluie.
- Par rapport à la teneur en eau moyenne, le drainage est la variable la plus adaptée pour étudier quantitativement l'ET aux échelles de temps annuelle.

3. Conclusion

Méthodes d'estimations :

- La méthode de bilan hydrologique est pratique.
- Cependant, les jours suivant des événements pluvieux, la méthode de la chambre peut être plus fiable, bien que nécessitant plus de temps et de travail.

Déterminants :

- L'épaisseur du substrat est le facteur le plus important pour l'ET des toitures végétalisées.
- La présence de la végétation a peu d'impact sur l'ET pour un substrat fin (3 cm).
- Les graminées ont une ET plus importante que les Sedums.

Simulation de l'ET :

- Hydrus 1D permet une simulation des processus hydrologiques sur la toiture.
- La variable utilisée pour le calage donne des cumuls annuels moyens d'ET différents.
- Nécessité d'effectuer un calage avec les ET évaluées.
- Pour un substrat de 15 cm, du Sedum, en moyenne interannuelle, l'ET représente entre 43 et 48%.

Contacts:

Ahmeda OUEDRAOGO, ahmeda.ouedraogo@cerema.fr

Emmanuel BERTHIER, emmanuel.berthier@cerema.fr