

Observations et modélisations de l'évapotranspiration issue de solutions fondées sur la nature pour la gestion à la source des eaux pluviales



Equipe de recherche TEAM
Emmanuel Berthier, Ahmeda Ouedraogo,
David Ramier, Jérémie Sage



Direction de la recherche
Stéphane Garnaud-Corbel



Laboratoire Eau, Environnement, Syst. Urbains
Marie-Christine Gromaire



Laboratoire Eau&Env
Katia Chancibault, Fabrice Rodriguez
Marie-Laure Mosini, Alexandra Mosset

L'évapotranspiration en ville:

Le flux d'évapotranspiration (ET) est un processus clé pour différents enjeux de la ville verte:

- la réduction du ruissellement, par abatement des pluies fréquentes
- l'adaptation aux vagues de chaleur, par l'effet de rafraîchissement local
- la physiologie et la pérennité de la végétation urbaine, en cohérence avec les stratégies d'irrigation

Le processus est complexe, particulièrement en ville, et reste méconnu scientifiquement:

- un terme du couplage des bilans hydrique et énergétique, et à l'interface sol-végétation-atmosphère
- l'ET reste significative en milieu urbain, mais sa mesure est complexe à cause des hétérogénéités présentes
- les schémas de modélisation actuels s'inspirent de ceux des milieux agricoles, avec des paramétrisations adaptées mais rarement évaluées

Les opérationnels sont démunis pour bien prendre en compte l'ET dans les pratiques de conception et de gestion, par manque de méthodes et d'outils pertinents

Action ModelET 2021-2025: modélisation multi-échelles de l'ET en milieu urbain

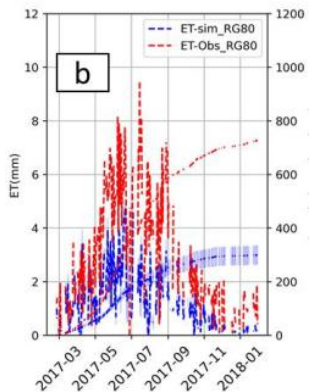
Mieux comprendre pour mieux prédire l'ET en ville, et en particulier autour de la végétation urbaine

Echelle de la solution végétalisée

Thèse A Ouedraogo (2024)

Modèle Hydrus 1D

Application (TV, jardin de pluie)



Journée technique
(05/12/2023)

*Connaissance de l'ET
Retex et mesure
Modélisation*

<https://professionnels.ofb.fr/fr/restitution/seminaire-roles-levapotranspiration-en-milieu-urbain>

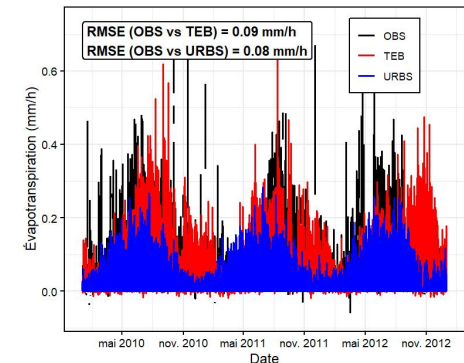
Echelle du quartier / agglomération

Post docs X Lafaille (2023) B Ebode (2025)

Modèle hydrologique URBS

Modèle hydroclimatique TEB-Hydro

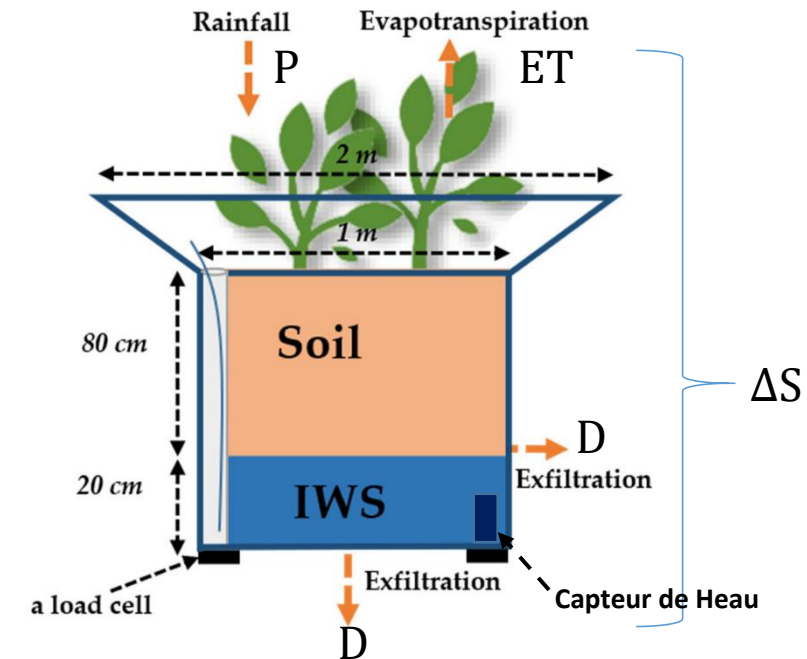
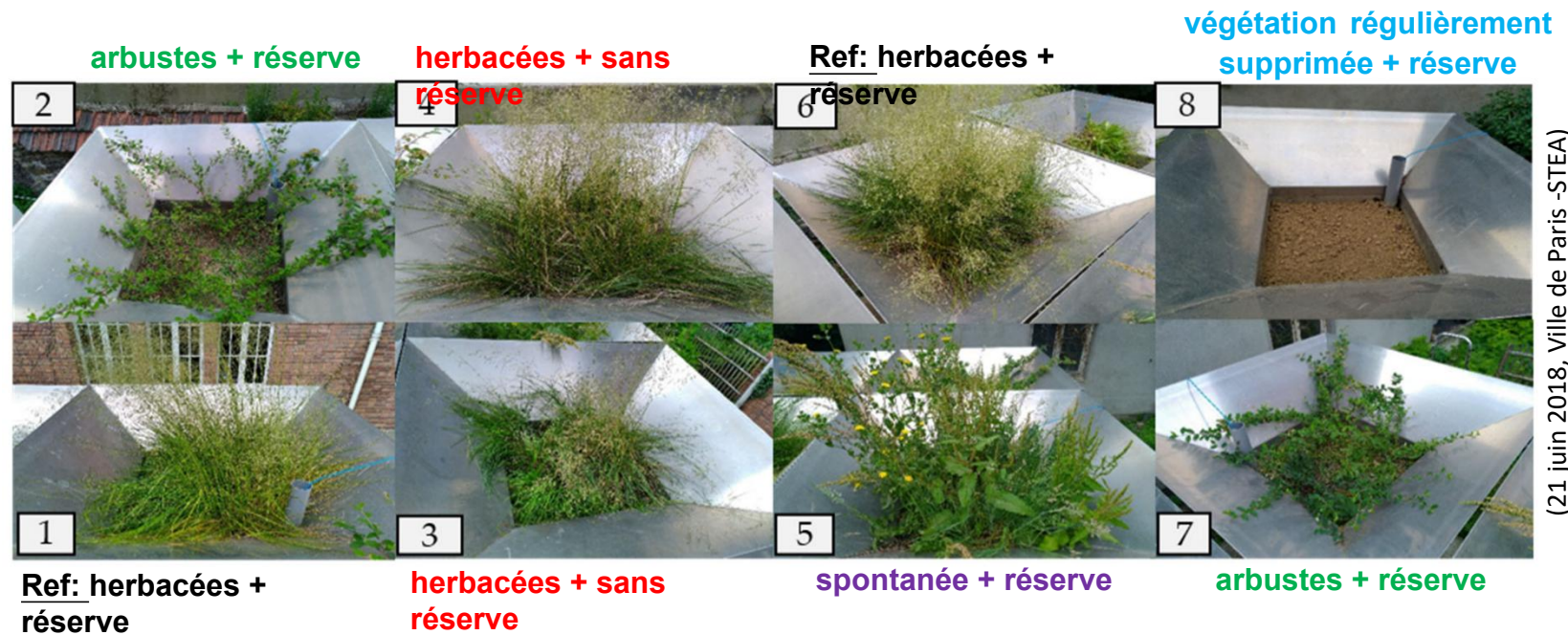
Application bassin versant Pin sec (ONEVU)



<https://ofb.gouv.fr/doc/les-benefices-de-evapotranspiration-en-milieu-urbain>

2. Estimation de l'ET issue de jardins de pluie

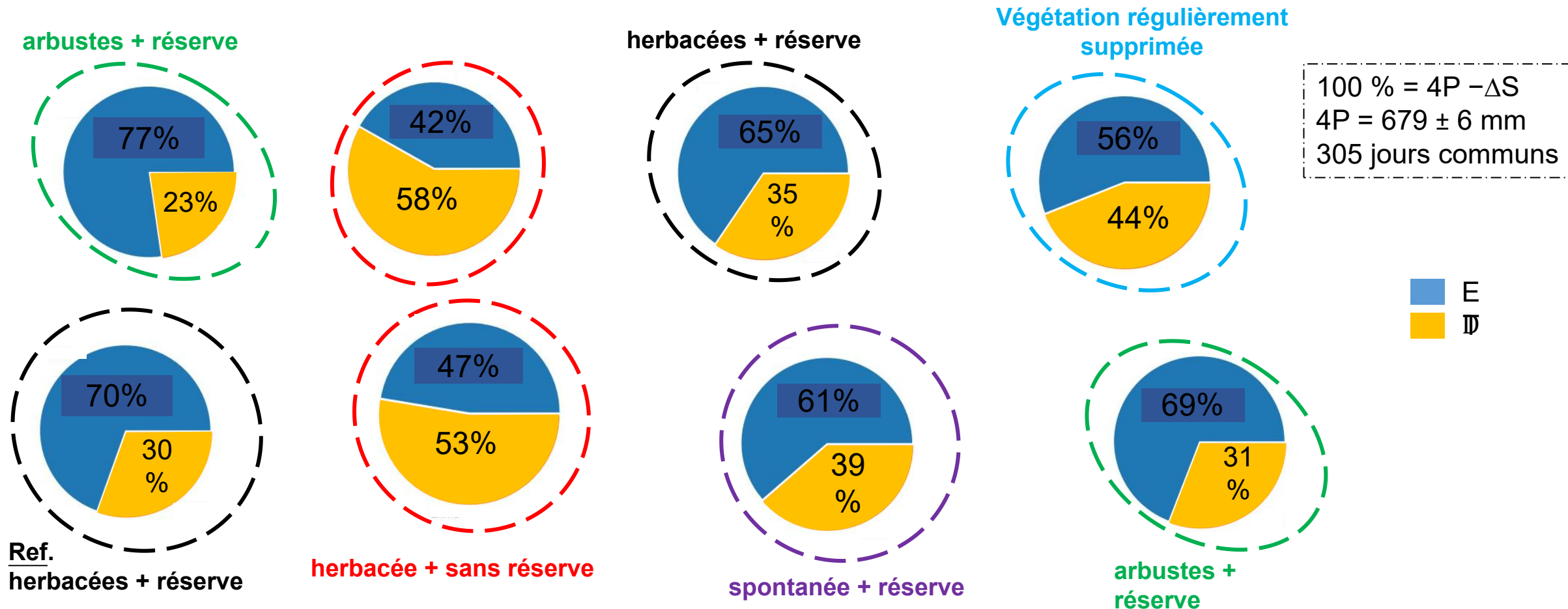
Huit lysimètres représentant différentes configurations de jardins:
+ mesures des variations de poids, du drainage et des conditions météorologiques
+ en continu, pendant plusieurs années (nov 2016 – déc 2019)



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

2. Estimation de l'ET issue de jardins de pluie

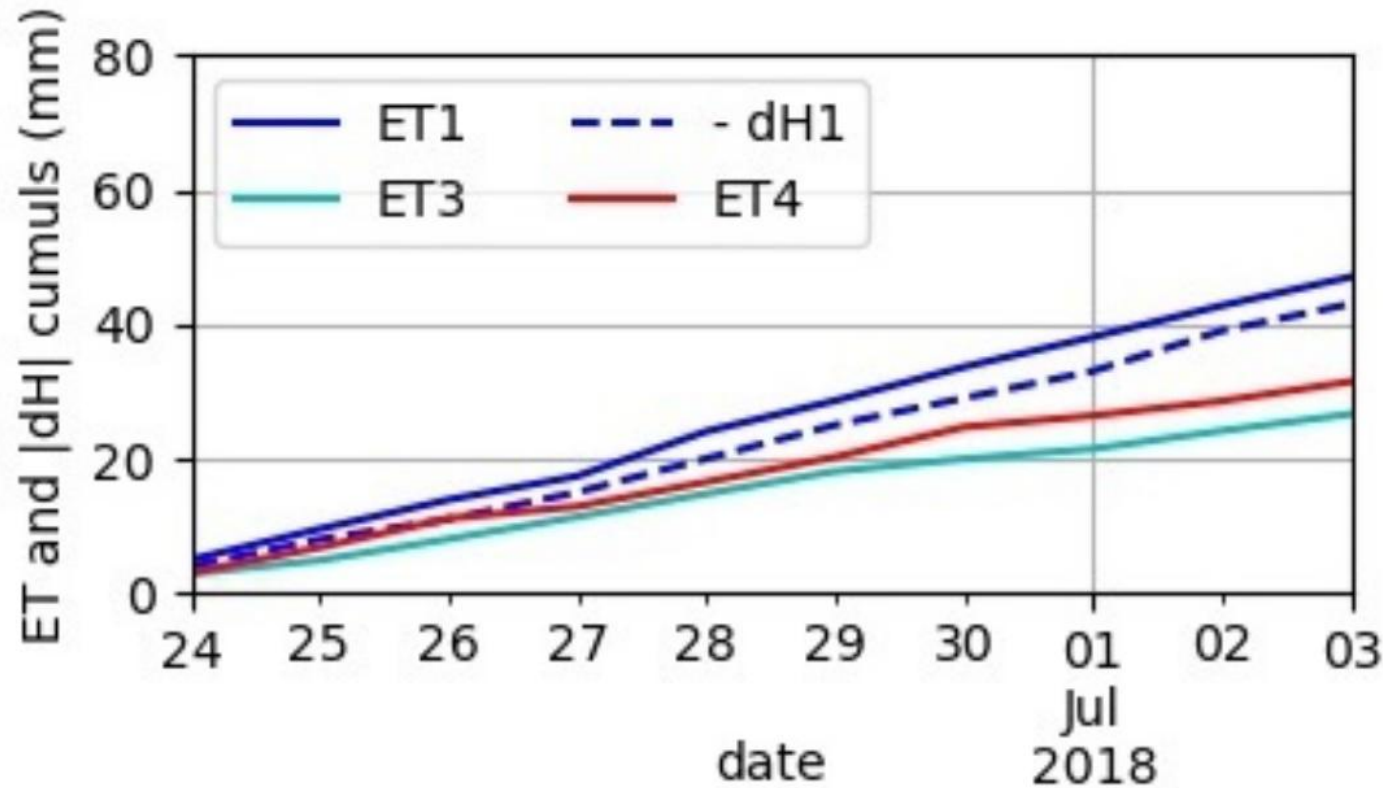
→ Bilan hydrologique des lysimètres:



- Stockage interne d'eau = déterminant le plus favorable
- Type de végétation = déterminant secondaire (arbuste > spontanée > herbacée > nu)
- Positionnement des lysimètres (ombrage, vent, ...) = source d'écart (lysimètres 2 et 7)

2. Estimation de l'ET issue de jardins de pluie

➔ Effet de la réserve : focus sur une période sèche

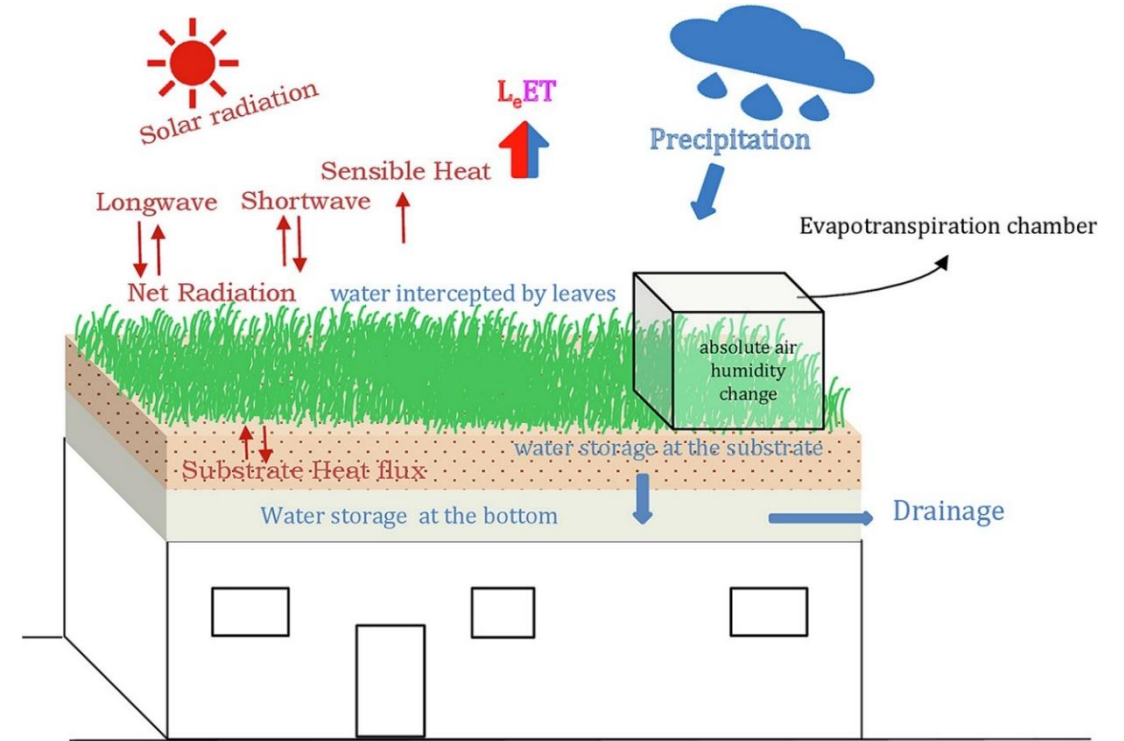
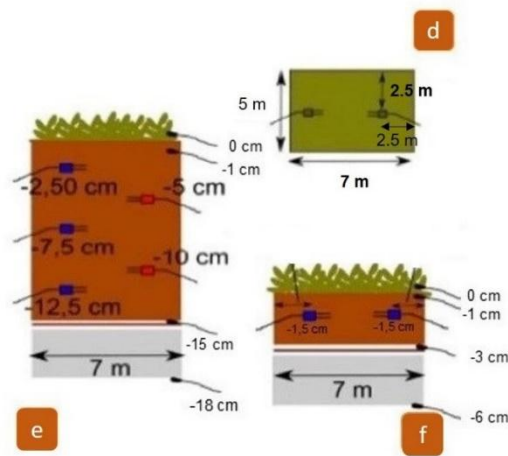


- Lysimètre 1 (avec réserve) :
 - ET1 = 47 mm
 - Variation d'eau de la réserve ($|dH1|$) = 85 à 87% de l'ET estimée
- Lysimètre 3 et 4 (sans réserve):
 - ET3 = 27 mm et ET4 = 31 mm
 - Début de stress hydrique

3. Estimation de l'ET issue d'une toiture végétalisée expérimentale

Mesures des bilans hydriques et énergétique de différents compartiments de toitures végétalisées extensives (variations de l'épaisseur du substrat et de la végétation) ...

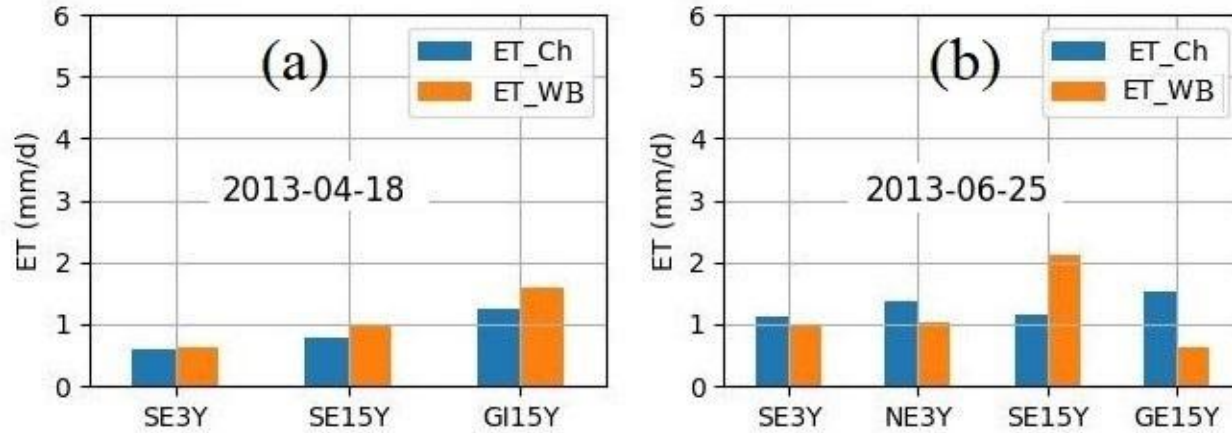
... et Comparaison de 3 méthodes d'estimation de l'ET



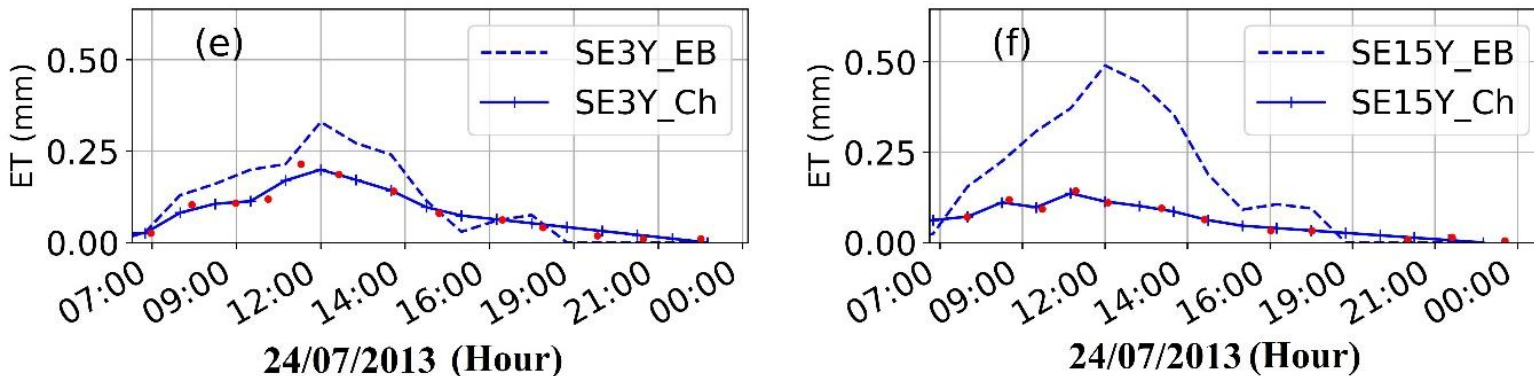
Evapotranspiration (ET) Processes on a Green Roof: **Water Balance**, **Energy Balance**, and an evapotranspiration Chamber

3. Estimation de l'ET issue des Toitures végétalisées expérimentales

→ Comparaison des méthodes



Chambre (Ch) vs. bilan hydrologique (WB)



Bilan d'énergie (EB) vs Chambre (Ch)

Bilan hydrologique vs chambre d'ET

- Ordres de grandeur similaires
- Incertitudes liées au nombre de capteurs de teneur en eau et à leur calibration ($\Delta ET \approx 29-39\%$)
- La chambre tend à sous-estimer l'ET (observé dans la littérature)

Bilan d'énergie vs bilan hydrologique

- Différences importantes, au printemps et en été ($EB > WB$)
- Incertitudes sur le flux de chaleur sensible
- Certains stocks d'eau non pris en compte : interception, rosée, flaques

Bilan d'énergie vs chambre

- $ET_{\text{bilan d'énergie}} = 1.6 \text{ à } 3 \times ET_{\text{chambre}}$
- Dynamique temporelle similaire ($R^2 = 0.78 - 0.96$)

3. Estimation de l'ET issue des Toitures végétalisées expérimentales

➔ Facteurs déterminant l'ET:

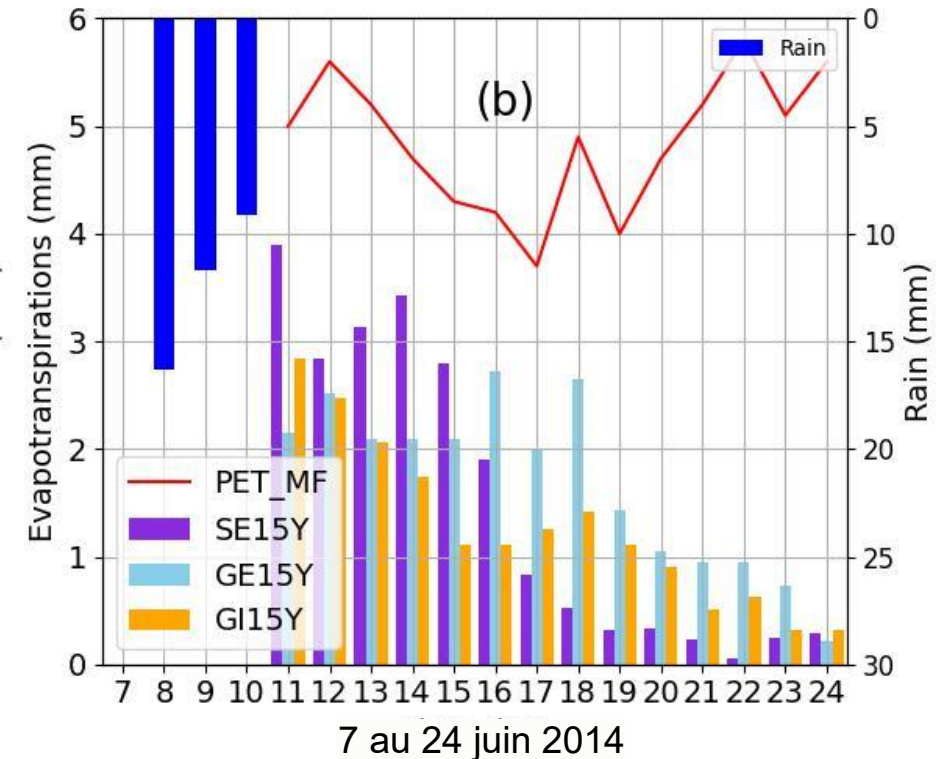
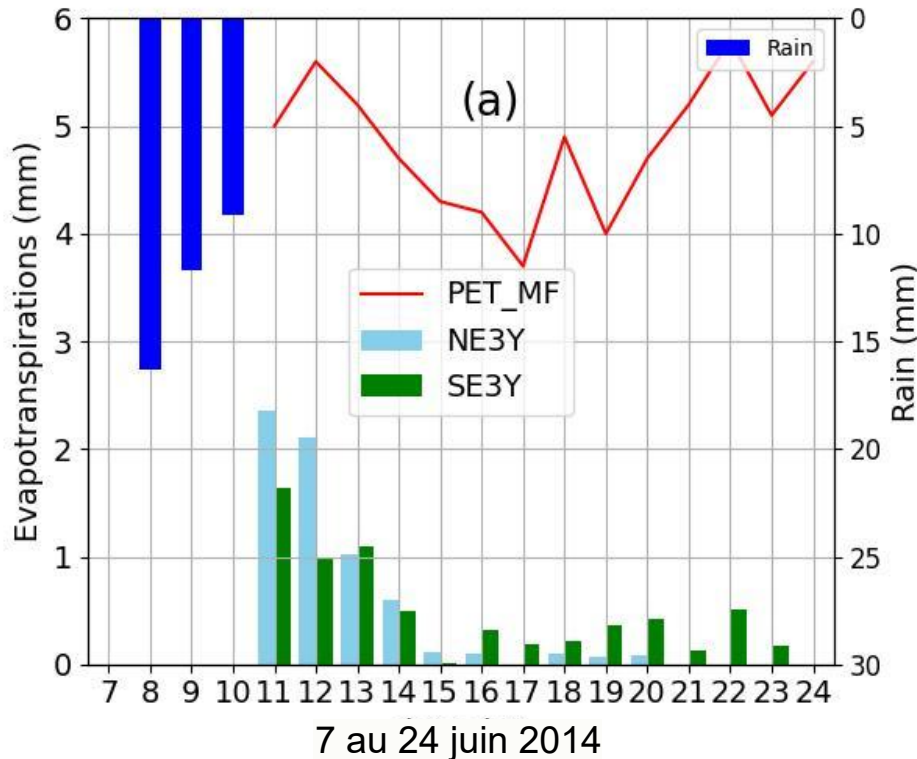


illustration sur une période sèche, avec la méthode du bilan hydrique

- ❖ Épaisseur du substrat cruciale pour l'ET
- ❖ Végétation impacte dynamique temporelle ; si eau disponible, graminées > sedum, sedum plus résistant si stress hydrique

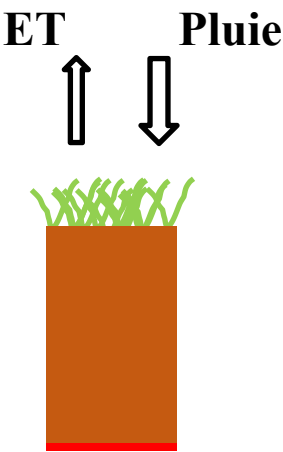
4. Modélisation de l'ET sur une diversité de SfN

Modélisation 1D verticale avec l'outil Hydrus (Simunek et al., 1998)

- Processus: ET potentielle (Penman–Monteith), écoulement en milieu poreux (Richards), extraction par les racines et stress hydrique (Feddes)
- Conditions aux limites: atmosphérique à la surface, suintement au fond

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

Courbe de rétention: $\theta(\psi)$ Courbe de conductivité hydraulique : $K(\psi)$ Terme(s) source/puit: $S(z, t)$



Modèle basé sur les processus, et très paramétré

- Nécessite encore un calage de paramètres, ...
- ... à partir d'intervalles réalistes de paramètres (littérature, connaissances sur les SfNs), tirages aléatoires de jeux de paramètres
- Plusieurs milliers de simulations pluriannuelles

→ Sélection de simulations « acceptables »

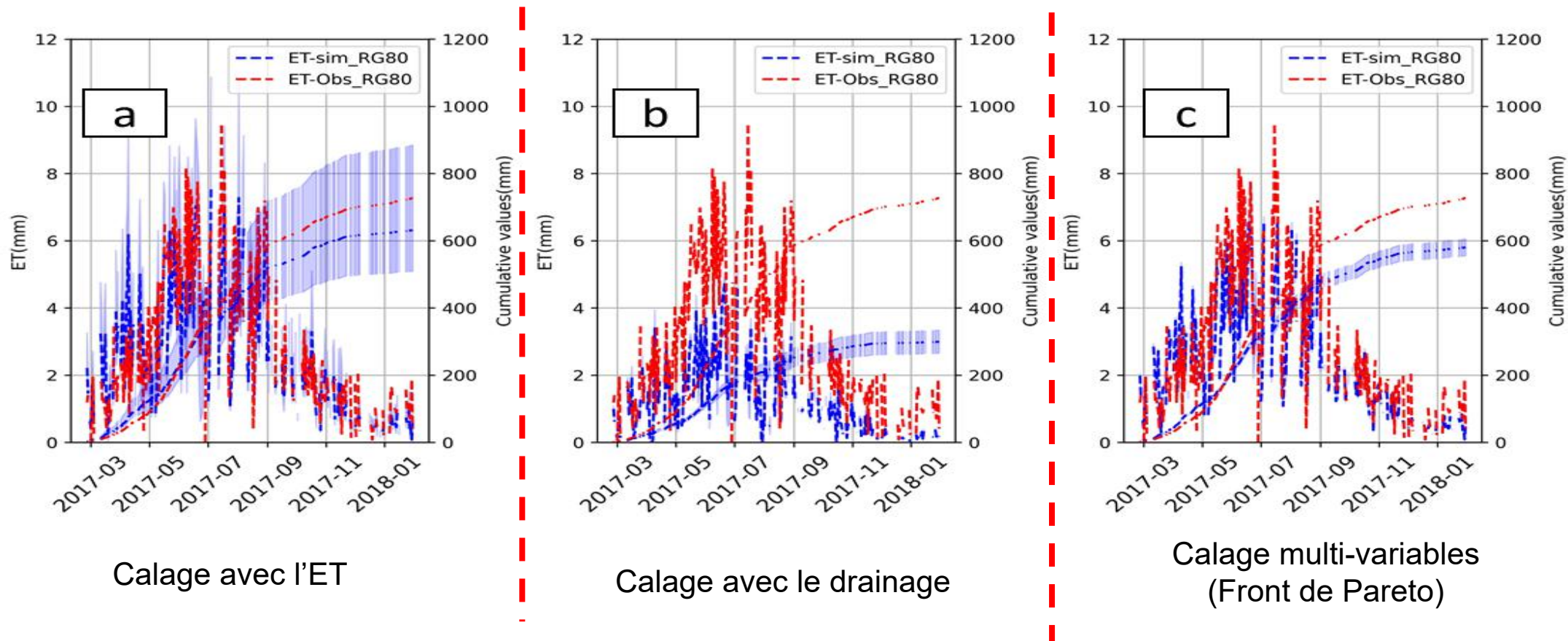
$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta_m - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$

r : coefficient de corrélation, β_m : biais, γ : coefficient de variation

Parameters		Parameter's space			
		Green roof			Rain Garden
		Bare soil (NE3Y)	Sedum (SE3Y / SE15Y)	Grass (GE15Y)	Herbaceous (RG80, RG100)
Soil	$\theta_r(\text{mm}^3\text{mm}^{-3})$	0.02 – 0.1 (0.084)			0.05 – 0.15 (0.09)
	$\theta_s(\text{mm}^3\text{mm}^{-3})$	0.35 – 0.6 (0.59)			0.4 – 0.6 (0.48)
	$\alpha(\text{mm}^{-1})$	0.01–0.07 (0.026)			0.001 – 0.07 (0.0014)
	n(–)	1.15 – 3 (1.52)			1.15 – 2.5 (1.32)
	$K_s(\text{mm/min})$	0.31 – 153 (5.1)			0.05 – 2 (0.1)
Vegetation	PET	$Z_0(\text{m})$	0.001 – 0.06	-	-
		LAI (–)	-	5 - 10	5 - 10
		$h_{veg}(\text{m})$	-	0.1 – 0.2	0.1 – 0.5
		$r_{s,f}(\text{s/m})$	-	50 – 200	100 – 600
	Associated parameters	rd(mm)	-	10 – 30 / 10 - 100	50 - 150
		a	-	0.02 – 0.2	100 - 600
		SCF	-	0.25 – 0.8	0.02 – 0.3
	Water absorption	P0 (mm), P0pt (mm)	-	-	0.79 - 1
		P2H (mm), P2L (mm)	-	(-200) – (-10), (-500) – (-200)	
		P3 (mm), w_c (–)	-	(-4000) – (-2000), (-15000) – (-5000)	

4. Modélisation de l'ET sur une diversité de SfN

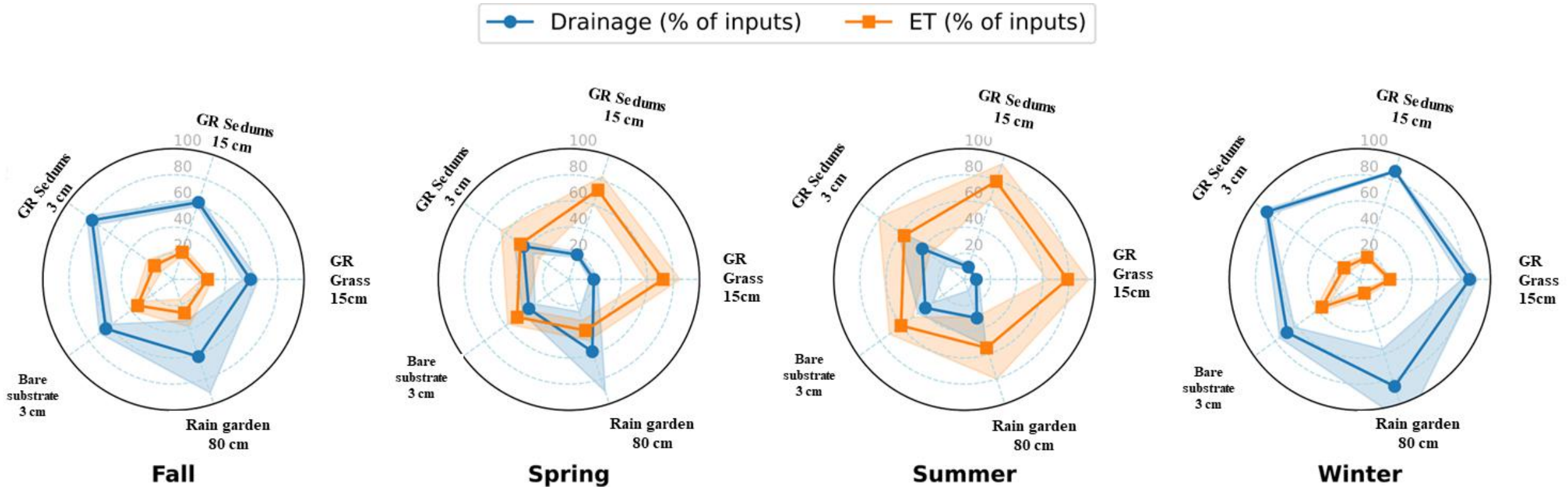
→ Etude des stratégies de calage sur le jardin de pluie sans réserve (RG80)



- ❖ Calage sur l'ET: en moyenne, plutôt satisfaisant mais avec un intervalle large ($550\text{mm} < \text{cumul} < 900\text{mm}$)
- ❖ Calage sur le drainage: forte sous-estimation de l'ET (> que sur les TV)
- ❖ Peu de simulations acceptées pour l'approche par front de Pareto (Ex: 2 simulations pour le RG80)

3. Modélisation de l'ET sur une diversité de SfN

→ Variations saisonnières du bilan hydrologique



- ❖ Au printemps et en été, l'ET devient le processus dominant par rapport au drainage.
- ❖ Une confirmation: même à l'échelle saisonnière, importance de l'épaisseur du substrat sur les toitures.
- ❖ Bilan jardin de pluie (80cm de limon et concentration de ruissellement) ~ bilan toitures végétalisées avec 3cm de substrat.

Conclusions:

L'action a permis de mieux comprendre et estimer le flux d'ET:

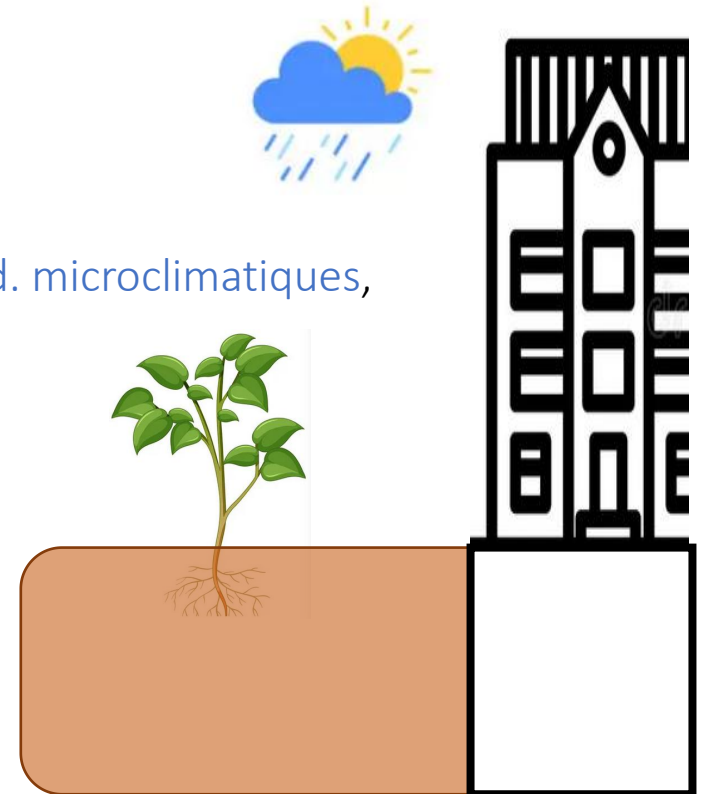
- ❖ des bases de données d'ET journalières critiquées, longues, et sur une diversité de SfNs
- ❖ mise en valeurs d'ET très variables selon les conditions météorologiques (saison), la disponibilité en eau (substrat peu épais < sol naturel épais < avec stockage dédié), et la végétation (< ETP Météo-France)
- ❖ la modélisation numérique permet d'approcher cette variabilité, mais nécessite encore un calage attentionné

Perspectives:

Observations: intercomparer différentes mesures à différentes échelles spatiales (feuille → quartier)

Modélisation: ETP à haute résolution (mètre et heure) et adaptée à la végétation urbaine

ETP = f (cond. microclimatiques, végétation)



Observations et modélisations de l'évapotranspiration issue de solutions fondées sur la nature pour la gestion à la source des eaux pluviales



Equipe de recherche TEAM
Emmanuel Berthier, Ahmeda Ouedraogo,
David Ramier, Jérémie Sage



Direction de la recherche
Stéphane Garnaud-Corbel



Laboratoire Eau, Environnement, Syst. Urbains
Marie-Christine Gromaire



Laboratoire Eau&Env
Katia Chancibault, Fabrice Rodriguez
Marie-Laure Mosini, Alexandra Mosset