

Comment les jardins de pluie fonctionnent-ils à Paris ?

Enseignements tirés du suivi de terrain et de la modélisation

Thèse menée dans le cadre d'OPUR 5 - Thème R3 :
Gestion à la source des eaux pluviales

Tinghao HUANG

Directrice de thèse : Marie-Christine Gromaire - Leesu

Co-encadrants : Jérémie Sage, Didier Técher – Cerema/Team

Limites des systèmes de drainage conventionnels

Système de drainage conventionnel



Problèmes

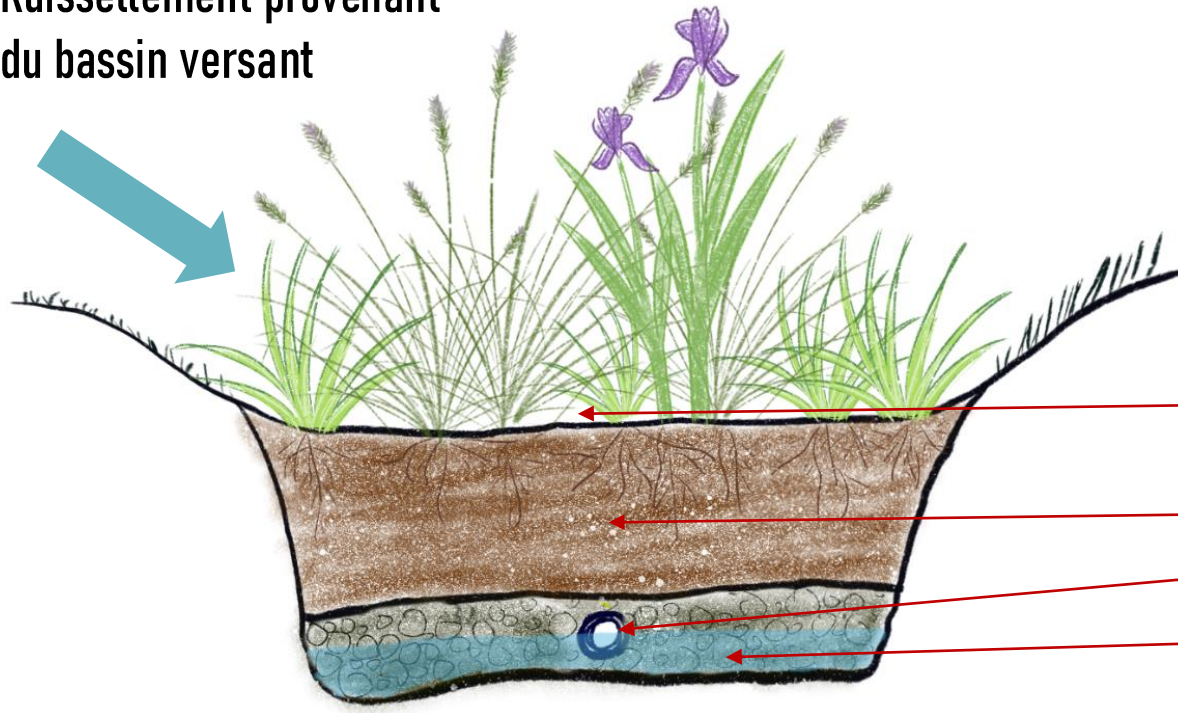
- Surcharge des réseaux centralisés
- Rejets polluants
- NE permet PAS la recharge des nappes
- Adaptabilité limitée
- Coûts de maintenance élevés

(Thames21, 2019; Chocat et al, 2001)

Sustainable urban drainage systems (SUDS)

Qu'est-ce qu'un « jardin de pluie » ?

Ruissellement provenant
du bassin versant



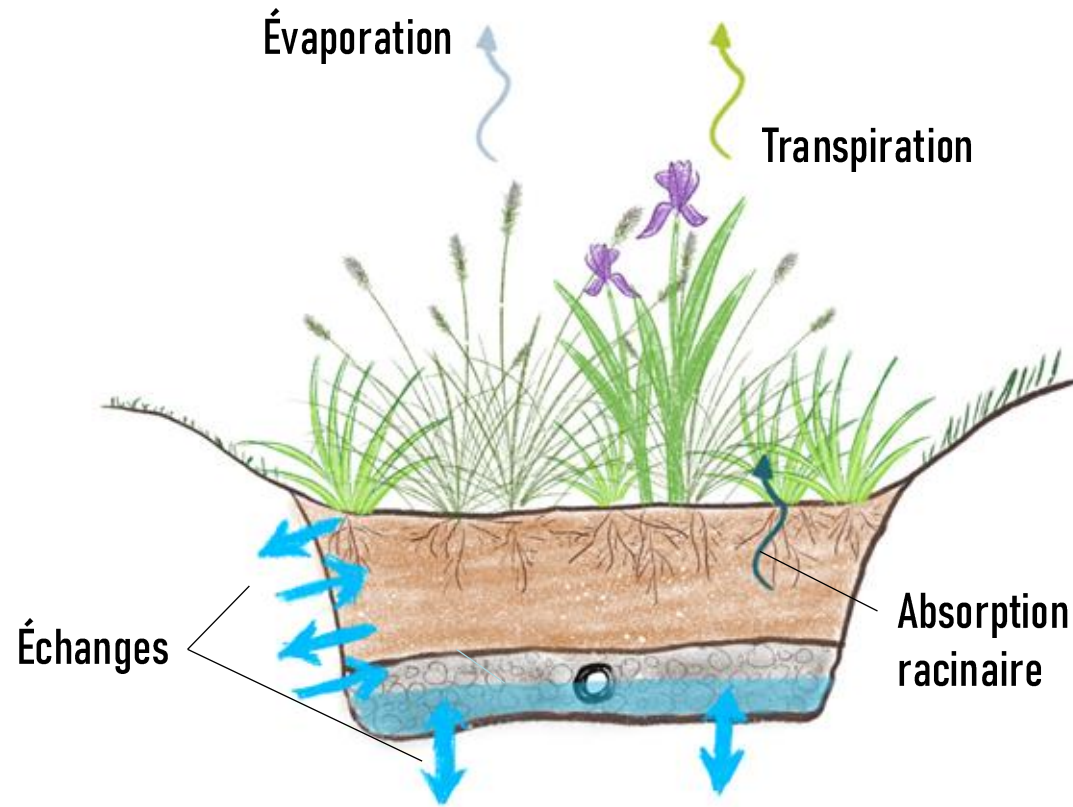
Définition

Dépression végétalisée conçue pour collecter, stocker temporairement et filtrer/infiltrer le ruissellement pluvial provenant d'un bassin versant imperméabilisé. (Prince George's County, 1993)

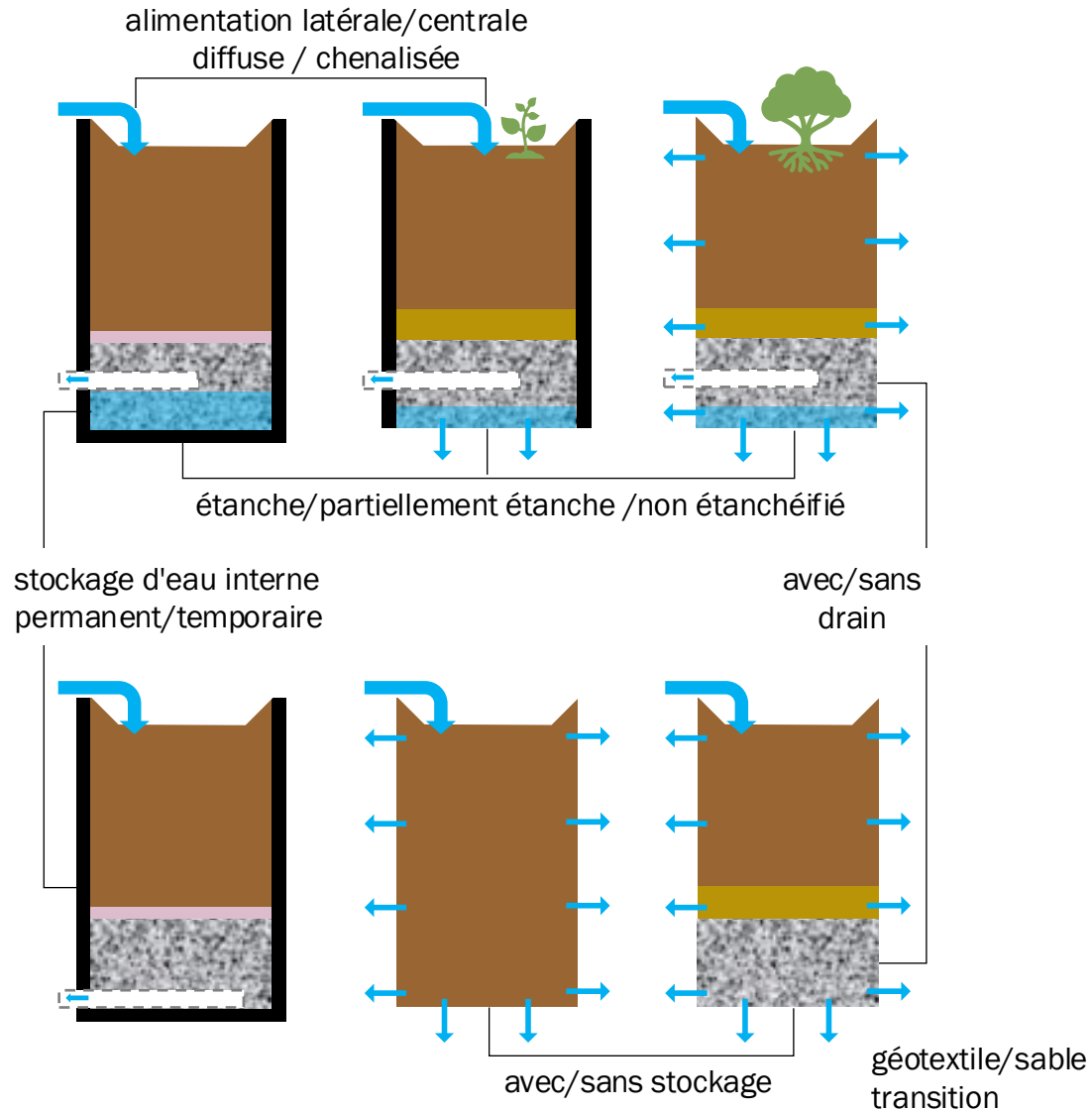
Structure

- Surface végétalisée
- Une ou plusieurs couches de substrat filtrant
- Couche/tuyau de drainage (optionnel)
- Stockage (optionnel)

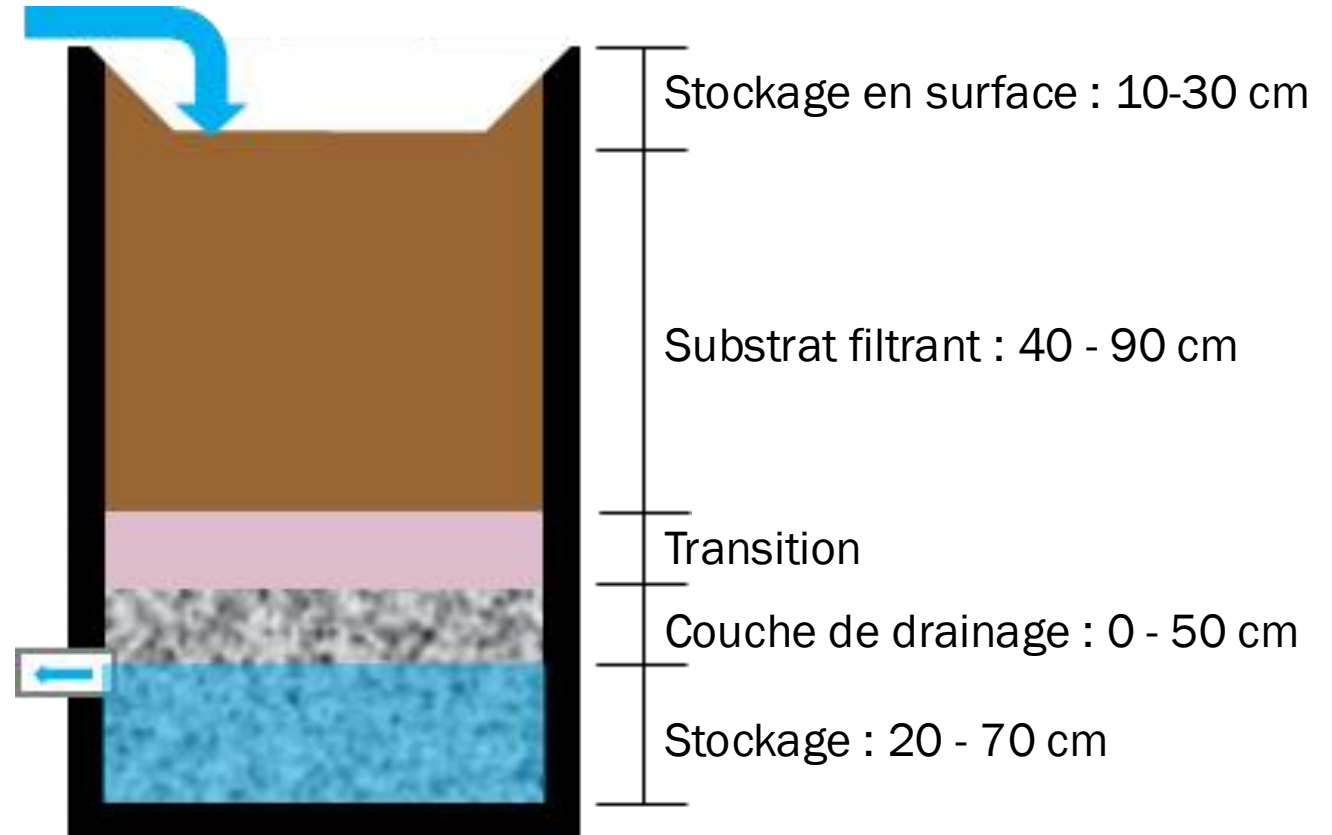
Processus hydrologiques



Une diversité de conceptions



Paramètres de conception



Contextes locaux



Contextes locaux – conditions locales du site où se trouve le jardin de pluie

- Régime des précipitations
- Évapotranspiration
- Type de sol sous-jacent
- Condition de la nappe

Dans le cas de Paris :

- Sous-sol gypseux
- Infrastructures souterraines
- Sous-sol pollué
- Sous-sol argileux



Exfiltration interdite par la réglementation

Taux d'exfiltration très faible

Objectifs de recherche

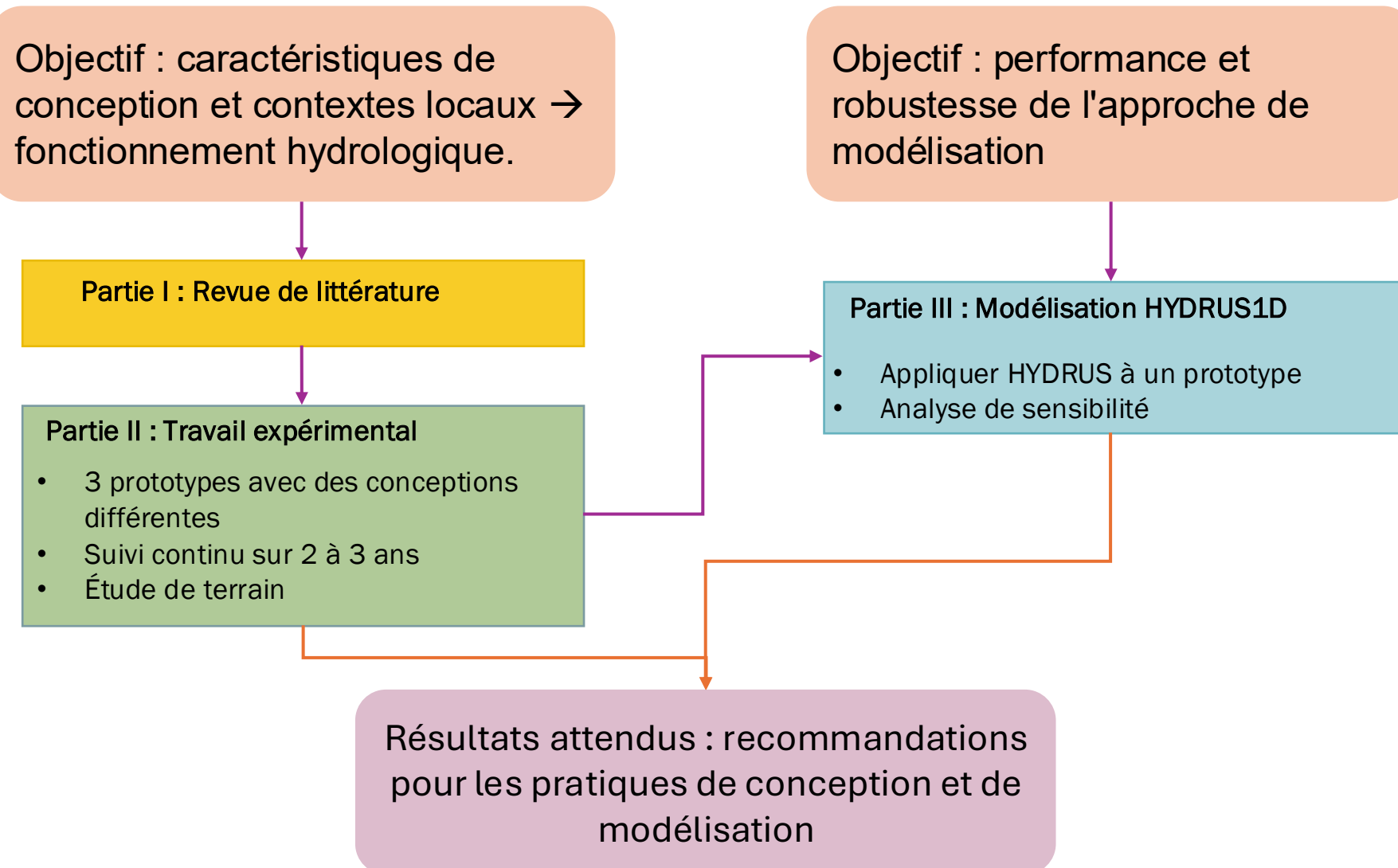
Questions

- Impacts de diverses caractéristiques de conception et contextes locaux sur leur fonctionnement hydrologique ?
- Performance et robustesse des approches de modélisation pour évaluer ces conceptions ?

Pour le cas de Paris, nous mettons l'accent sur :

- climat d'Europe de l'Ouest
- conditions souterraines défavorables
 - systèmes non étanchéifiés à faible potentiel d'exfiltration
 - systèmes étanchéifiés reposant sur l'ET pour la réduction de volume
- substrats filtrants alternatifs (texture fine) pour la résilience à la sécheresse

Approche générale



03. Expérimentation de terrain

Sites expérimentaux



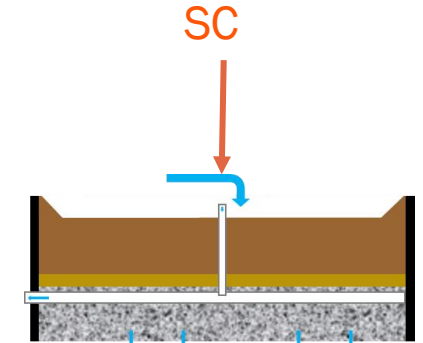
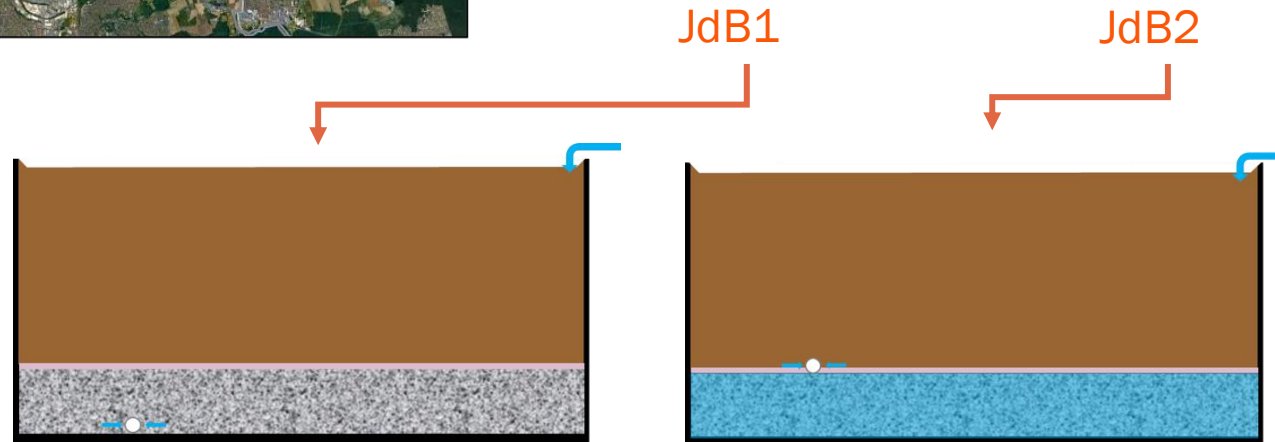
Jardin du Breuil : JdB



Sense-City : SC

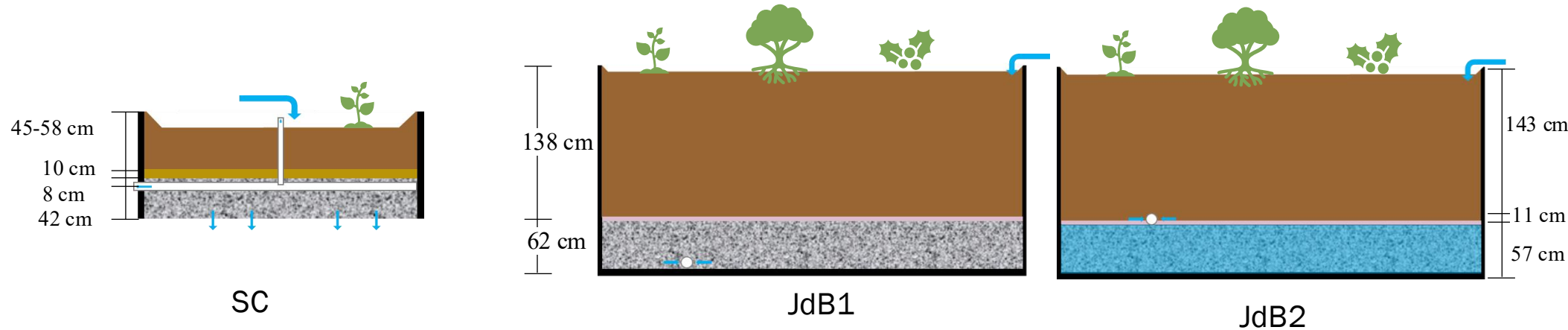


JdB : Système étanche reposant sur l'ET avec/sans stockage d'eau interne (IWS)



SC : Système non étanche mais faible potentiel d'exfiltration

Sites expérimentaux - Comparaison des trois prototypes

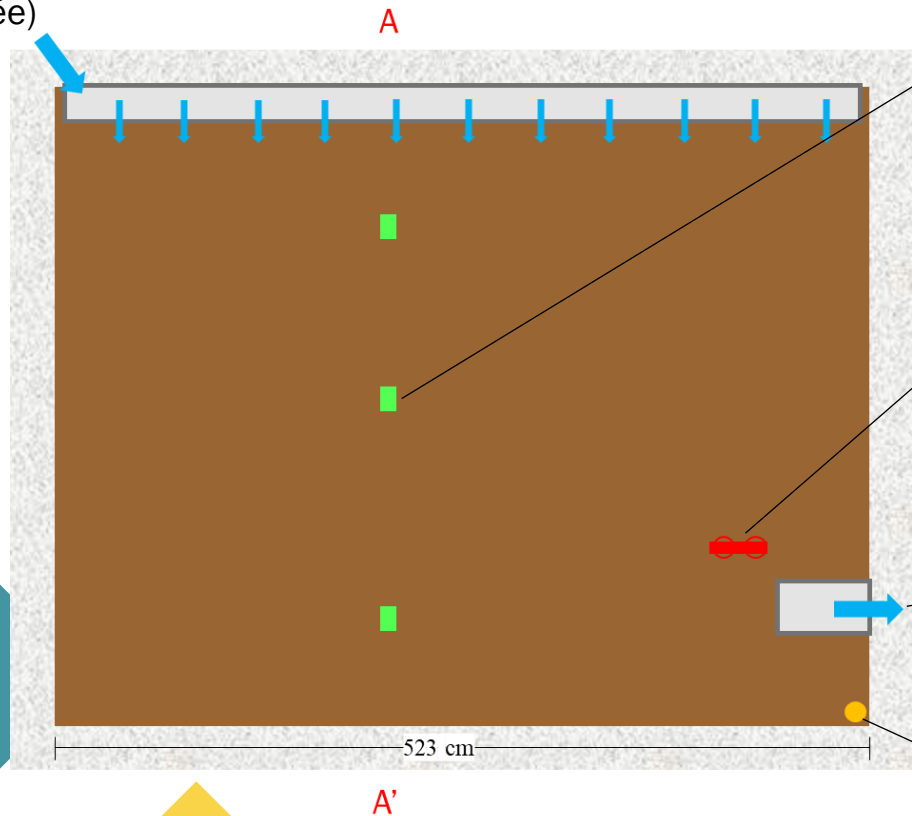


	SC	JdB1	JdB2
Surface du jardin [m2]	7	25.1	
Surf impluvium / surf. jardin (HLR)	13.4	3.9	
Type de substrat	Substrat technique (limon sableux)	Sol de jardin typique à Paris (limon)	
Couche de transition	Sable	Géotextile	
Végétation	Plantes herbacées	Herbacées, arbustes et petits arbres	
Stockage d'eau interne (IWS)	Temporaire	Non	Oui
Condition d'étanchéité	Sol sous-jacent argileux	Étanchéifié	

Sites expérimentaux - Configuration des capteurs (JdB1&2)

Débitmètres
électromagnétiques +
augets basculants
(entrée)

Vue de dessus



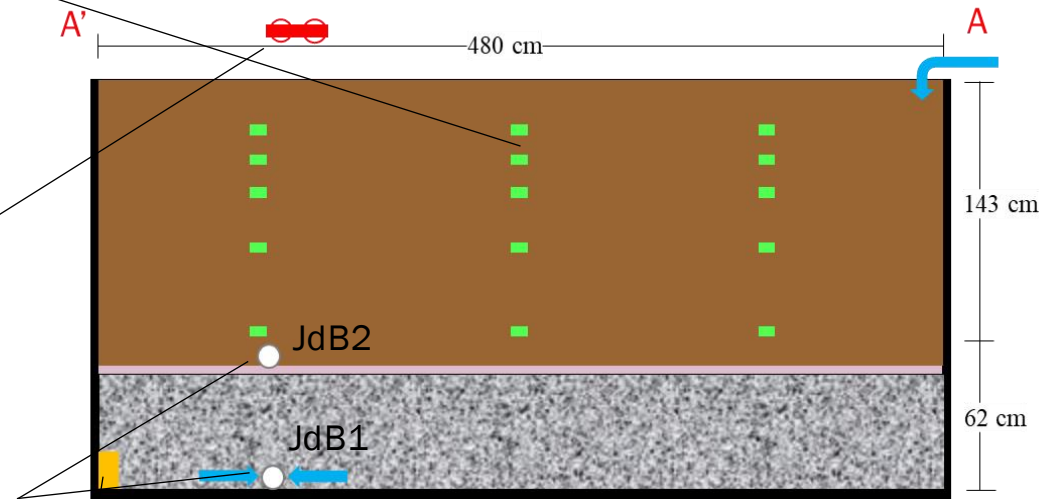
Capteurs d'humidité
du sol

Capteurs de
rayonnement
solaire

Débitmètre à
augets
basculants
(sortie)

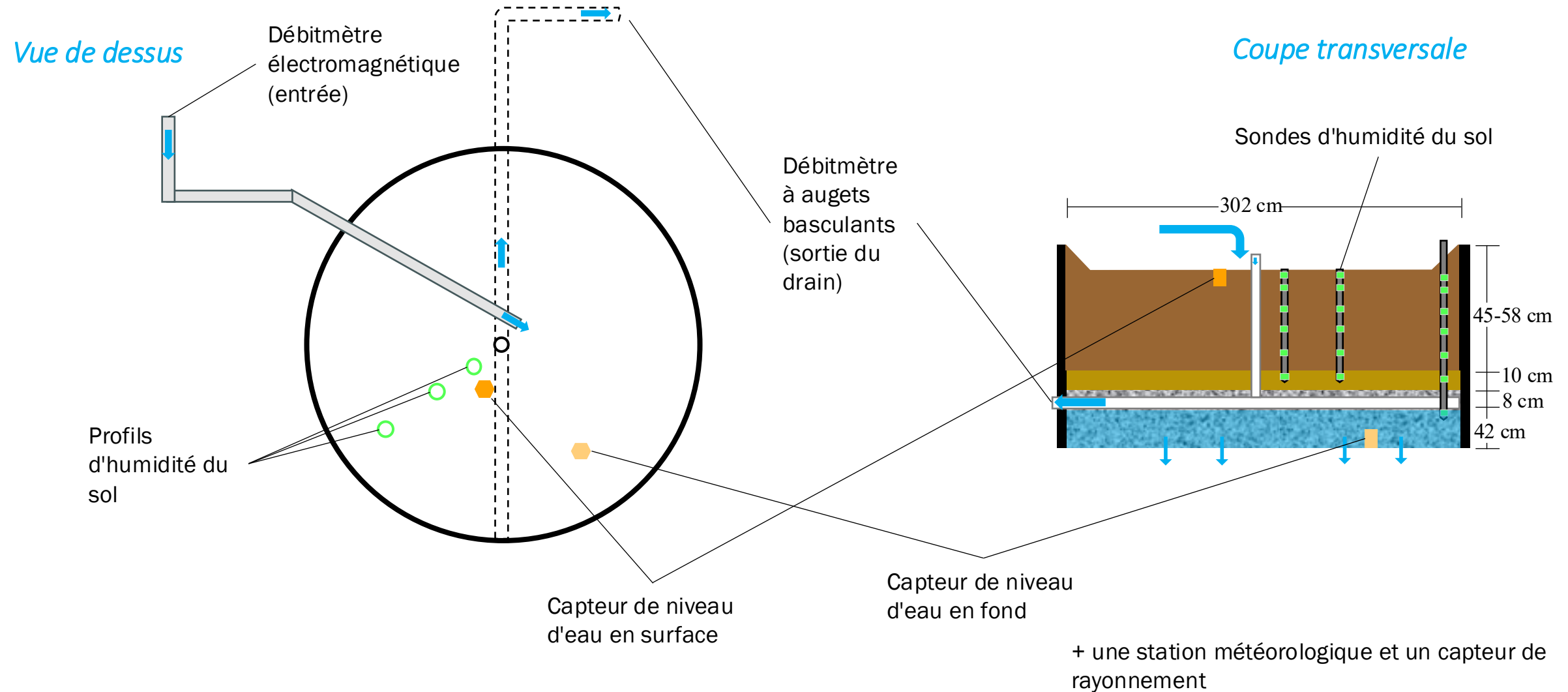
Capteurs de niveau
d'eau (stockage en
fond)

Coupe transversale



+ une station
météorologique

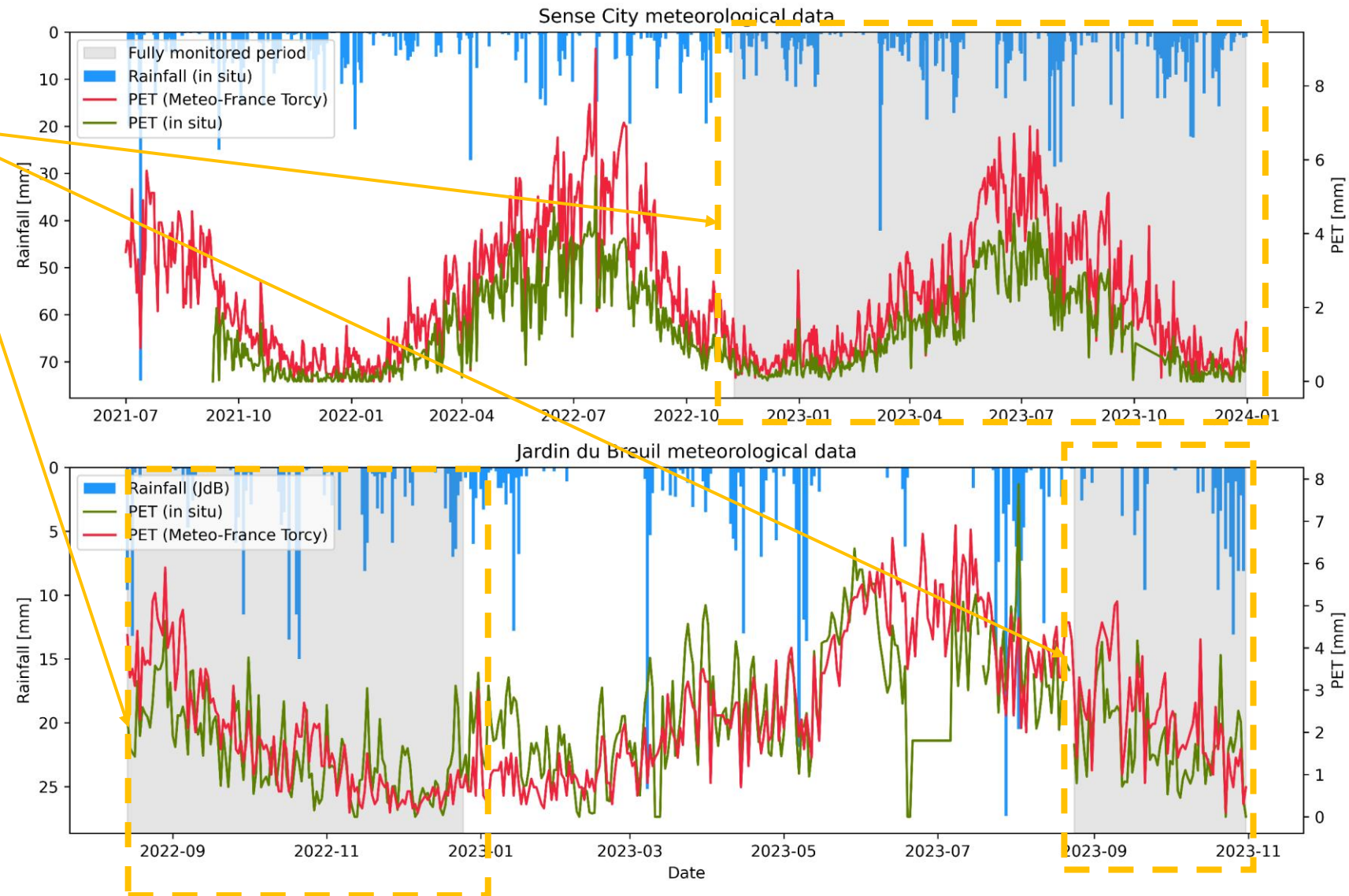
Sites expérimentaux - Configuration des capteurs (SC)



Sites expérimentaux - Période de suivi

Statistiques pour les périodes avec un suivi complet.

	SC	JdB
Précipitations cumulées [mm]	858	286
ETP <i>in-situ</i> [mm]	526	418
Durée de la période [d]	378	203

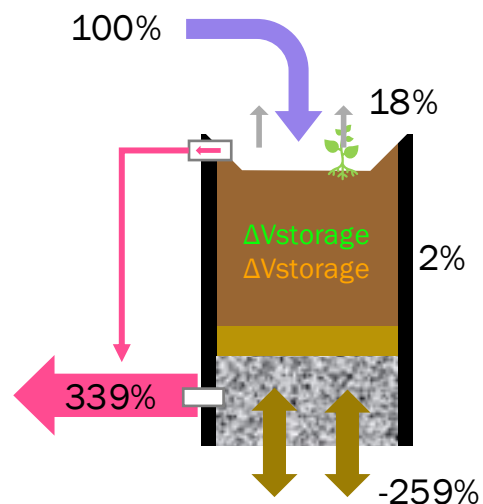


Résultats - Bilan hydrique cumulé

- Vue d'ensemble des 3 jardins de pluie

$$Q_{inflow} + \sum P_{direct} \cdot A = Q_{outflow} + \sum PET \cdot A + \Delta V_{soil\ water} + \Delta V_{gravel\ water} + \overset{SC\ seul}{V_{exfil}} + V_{closure}$$

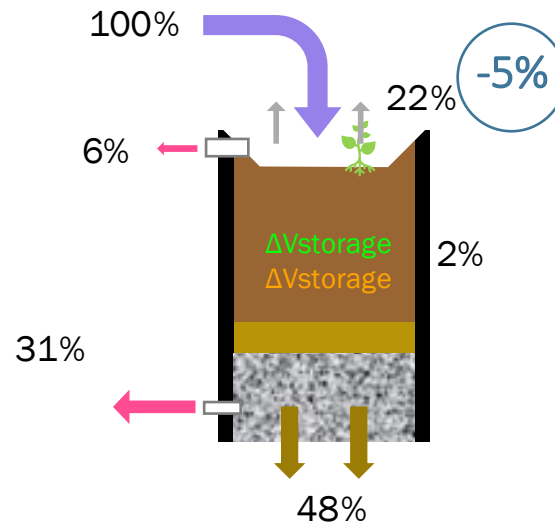
- Incertitude des capteurs
- Différence entre ET et PET



SC avec intrusion d'eau

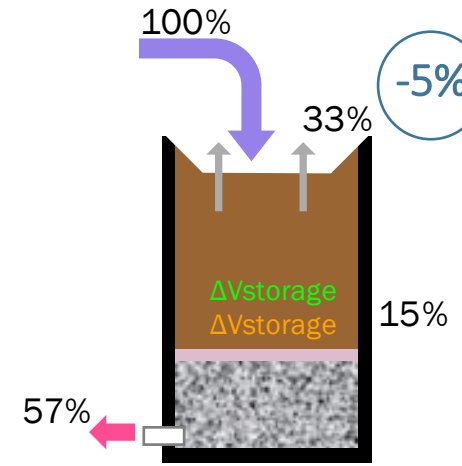
Le débit sortant représente 3 fois le volume total entrant !

→ Intrusion d'eau souterraine peu profonde



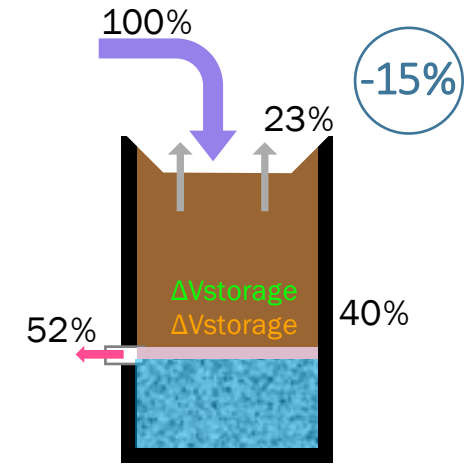
SC « théorique »

La moitié du volume entrant s'exfiltre malgré la faible perméabilité du sol sous-jacent



JdB1

Environ 30 % de réduction du volume de ruissellement via l'ET

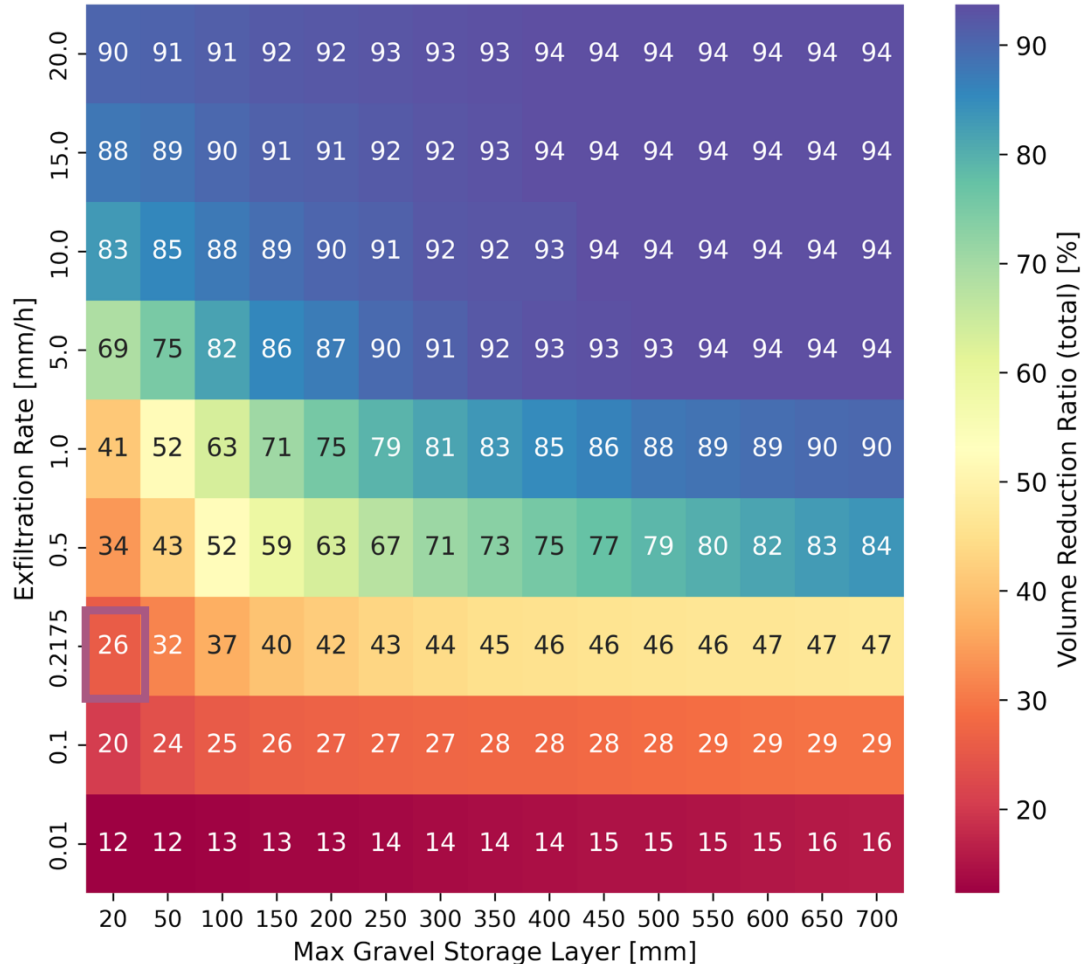


JdB2

Terme de fermeture important + variation du stockage

Résultats - Bilan hydrique cumulé

→ Analyse de scénarios (Ks du sous-sol et profondeur du stockage de gravier) fondée sur le modèle réservoir



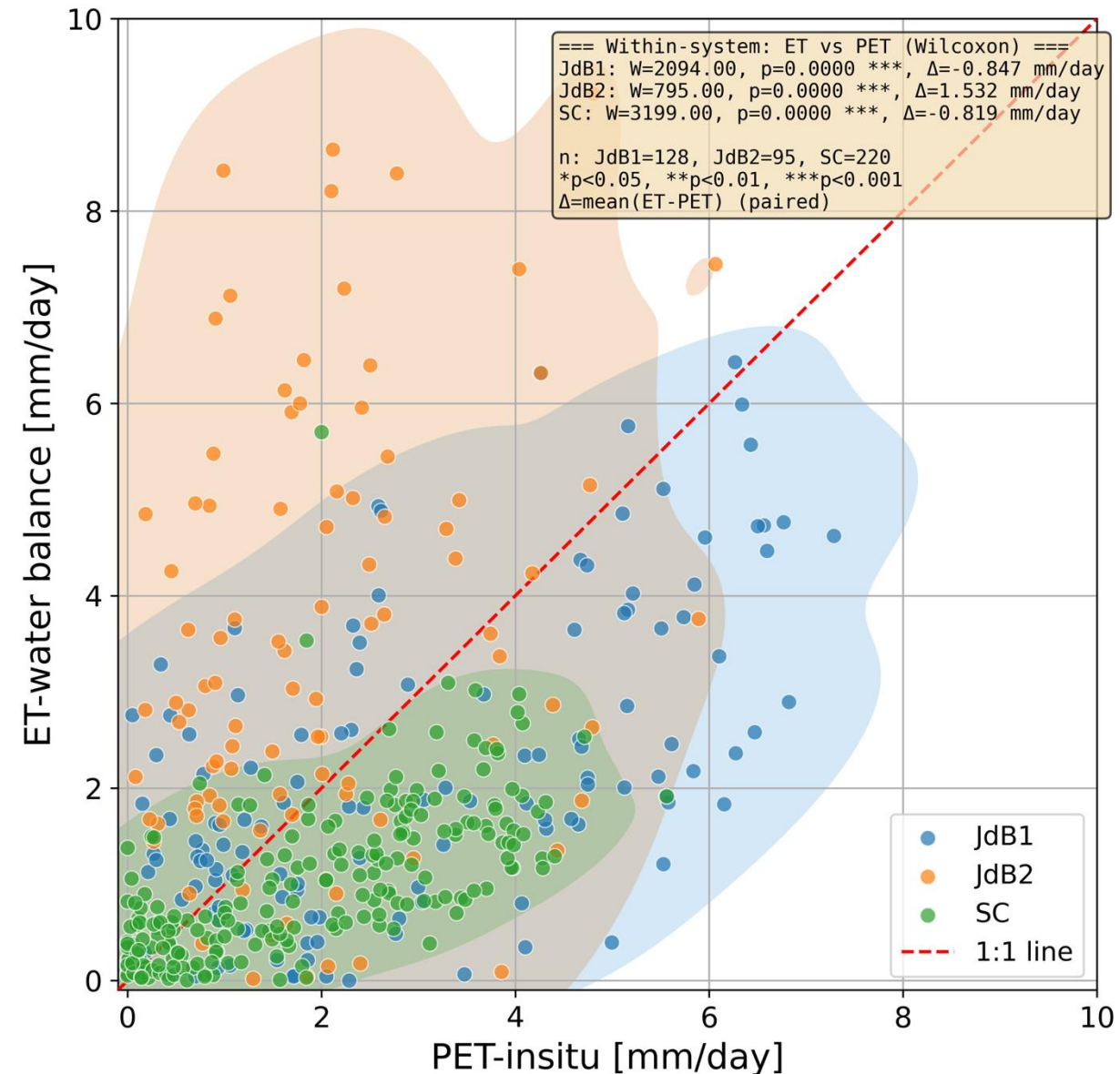
$$\text{Total volume reduction ratio (VRR)} = 1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Principaux résultats

- Quelques cm de stockage gravier en fond → exfiltration significative (même pour un sol natif argileux).
- Augmenter la profondeur de stockage au-delà de 30 cm apporte une valeur ajoutée limitée.

Résultats - Évaluation de l'évapotranspiration (ET) pendant les périodes sèches

- SC et JdB1 : globalement $ET < ETP$
- JdB2 : $ET > ETP$
- L'IWS permet d'obtenir une ET plus élevée que sans IWS, et même $> ETP$
- ET trop élevé dans JdB2 → incertitude de mesure / Sous-estimation de l'ETP



04. Modélisation

Objectifs de modélisation

Pour les systèmes suivis



Objectif : évaluer l'exactitude et la robustesse de l'approche de modélisation

La performance hydrologique du jardin est-elle correctement modélisée ?

→ Comparaison aux mesures de débit et de teneur en eau du sol

Pour les systèmes non instrumentés
(projet d'aménagement)



Quelle fiabilité d'une telle modélisation dans des situations où nous ne disposons pas d'information précise sur certains paramètres ?

→ Analyse de sensibilité sur différentes entrées

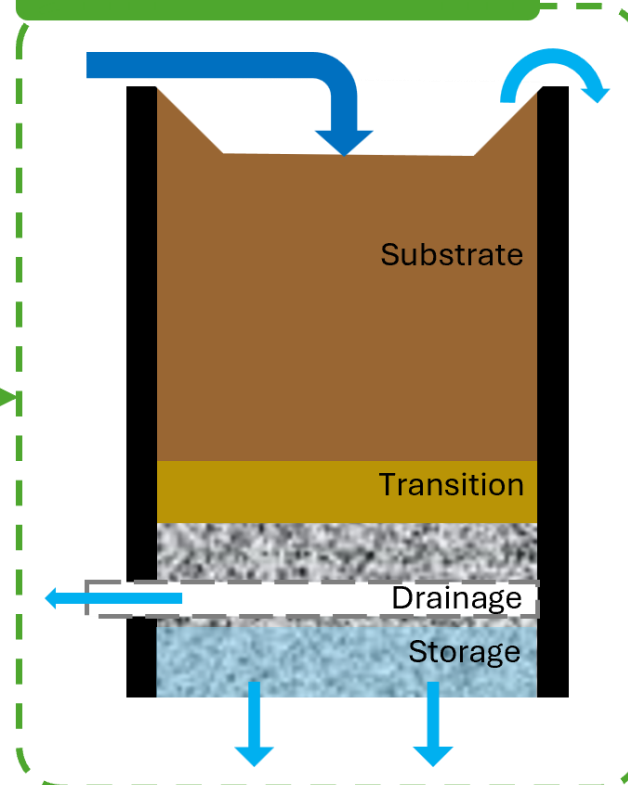
(Source : <https://www.ciup.fr/>)

HYDRUS 1D + Modèle Reservoir

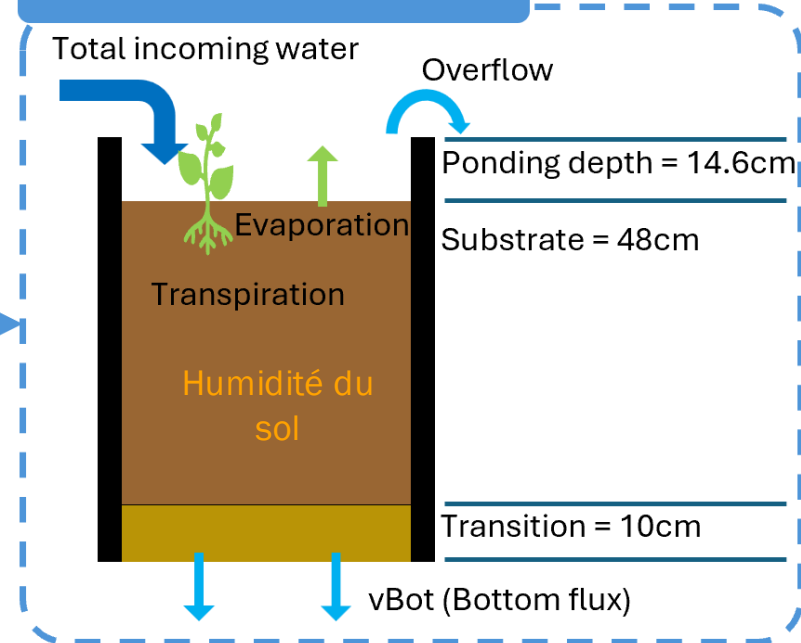
Field photo of pilot device



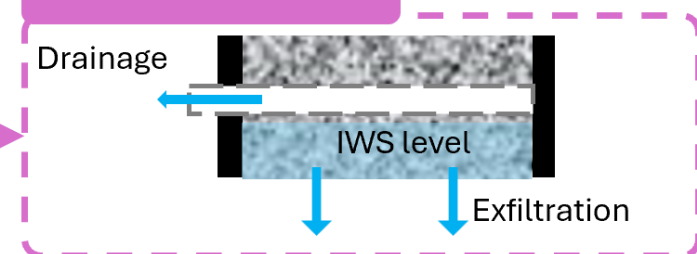
Schematic of pilot device



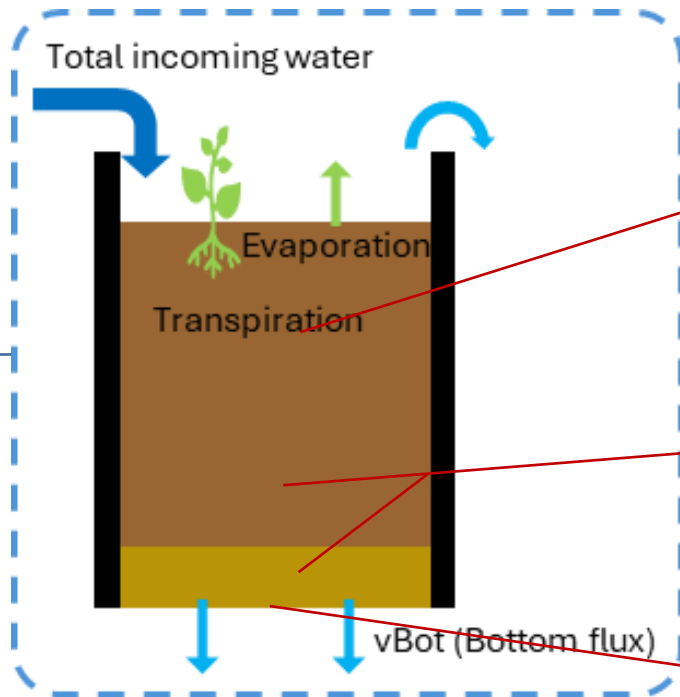
HYDRUS representation



Reservoir model



Paramètres d'entrée testés



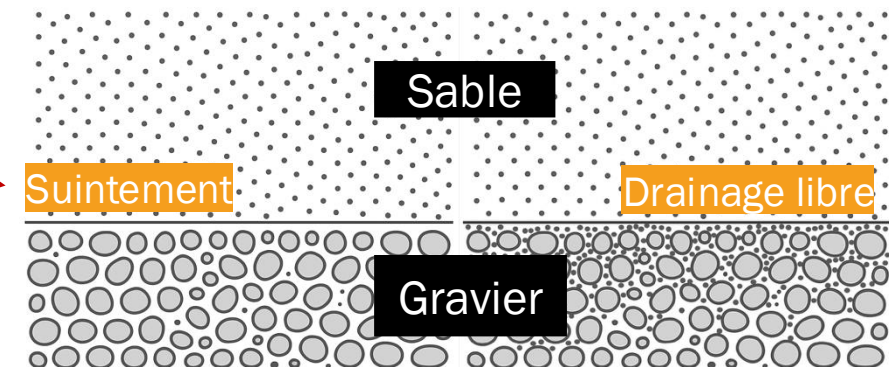
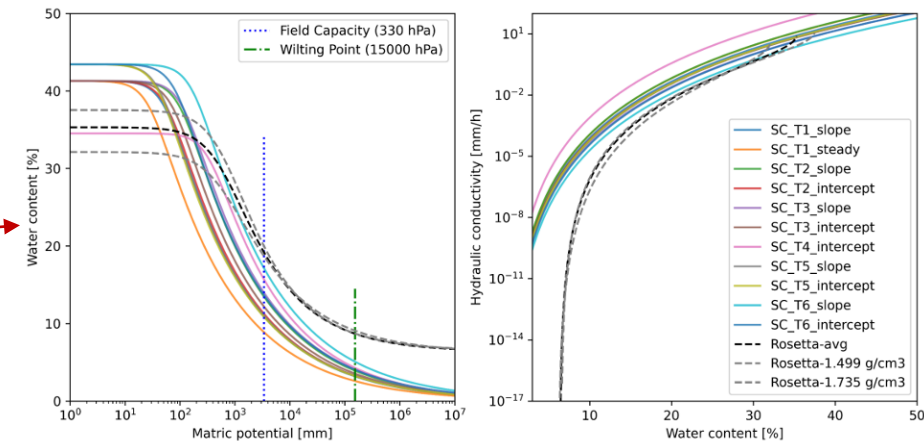
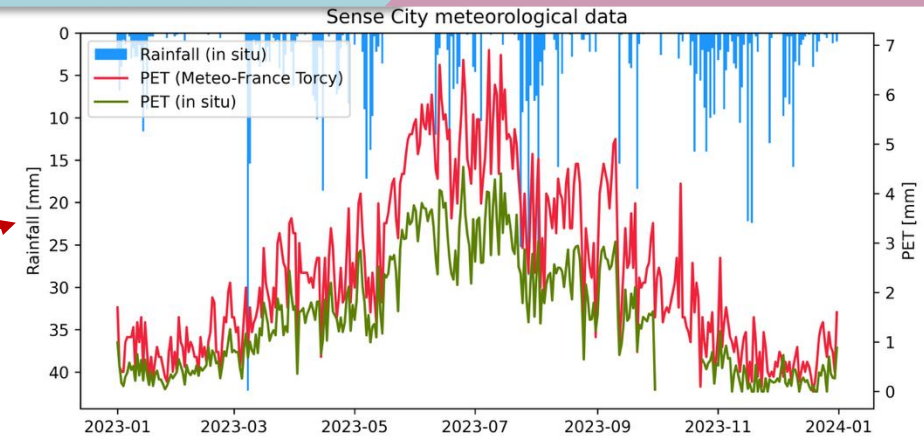
ETP : 2 scénarios (in situ, Meteo France)

Paramètres hydrodynamiques du sol:
14 scenarios substrat x 3 scénarios transition

Conditions limites avalles :
2 scénarios

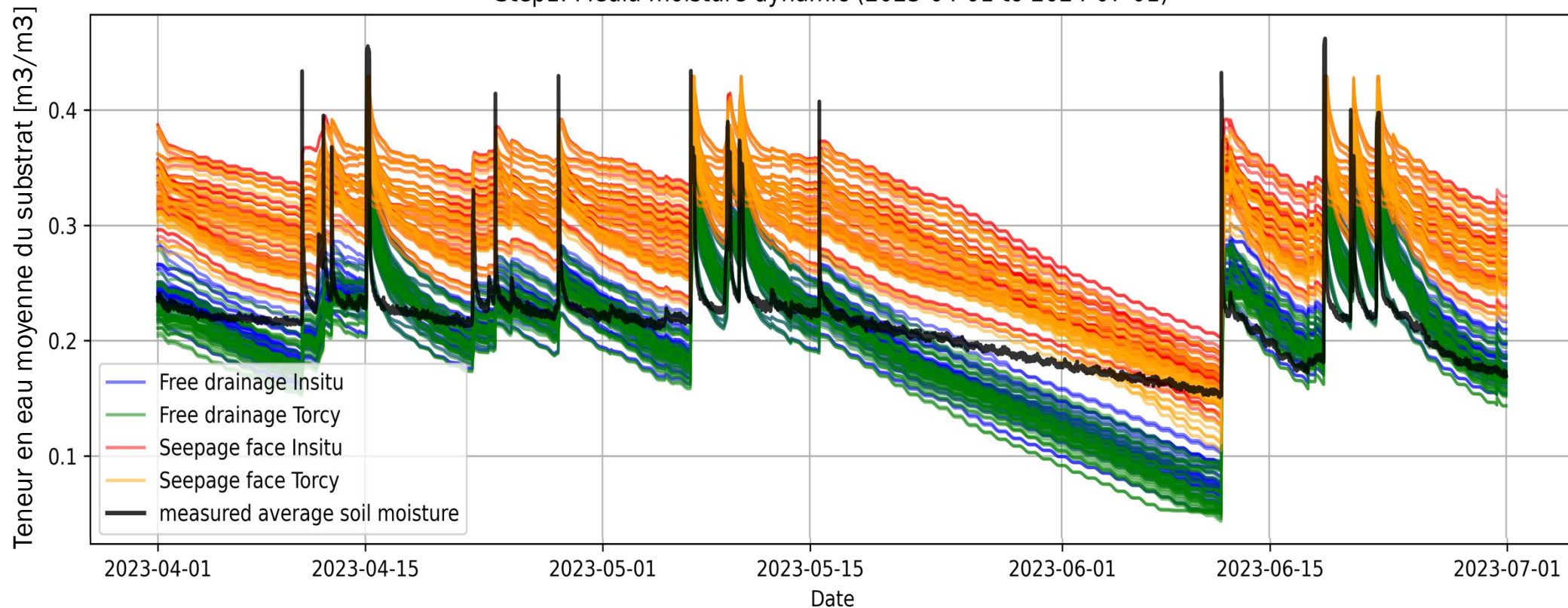
Paramètres de végétation :

- Fraction de couverture de surface
- Distribution racinaire
- Modèle d'absorption racinaire



Résultats - Variation de teneur en eau dans le substrat

Step1: Media moisture dynamic (2023-04-01 to 2024-07-01)



La teneur en eau modélisée en temps sec est

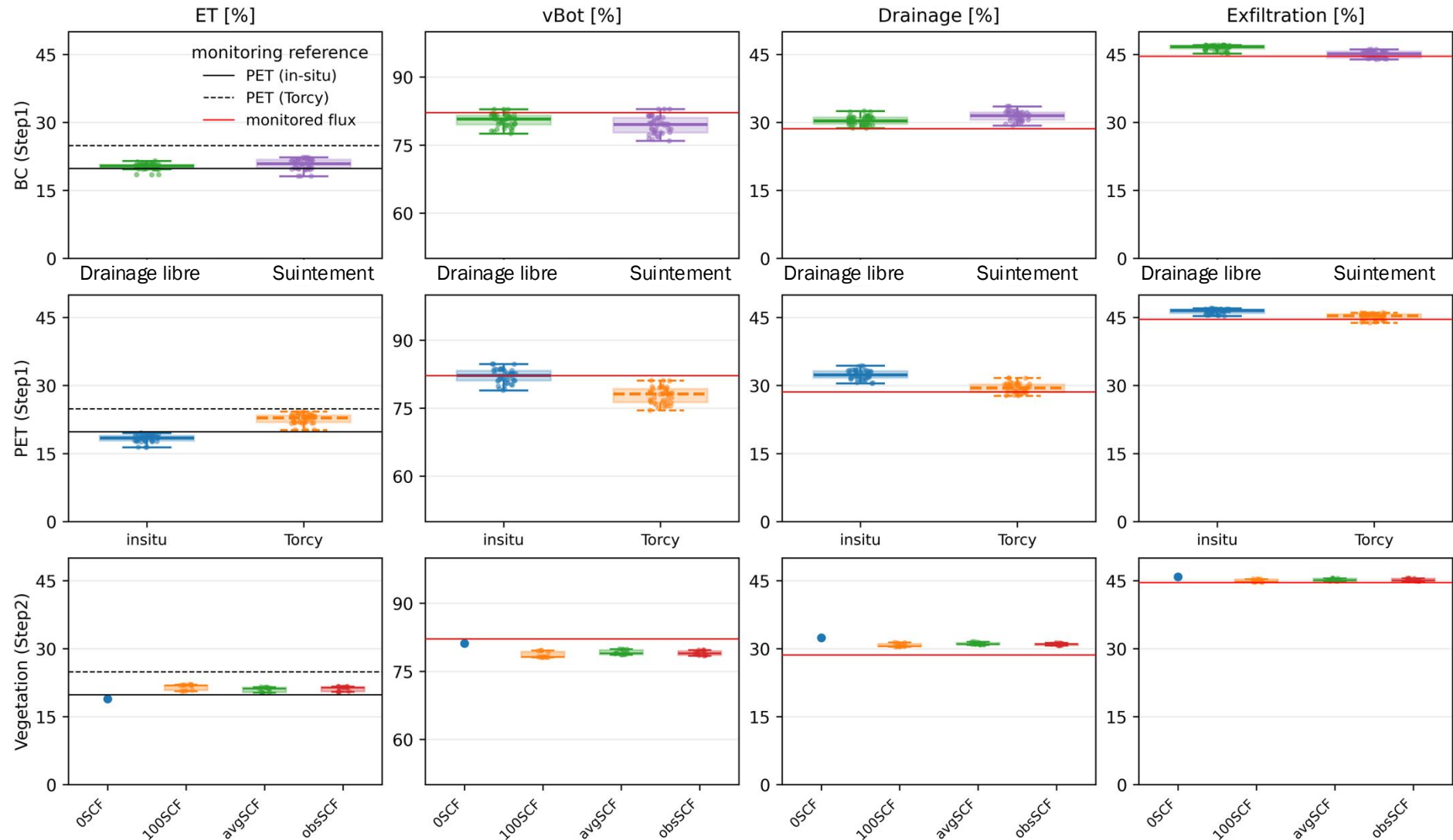
- Très sensible à la condition limite aval : sol nettement + humide en condition limite de suintement que en drainage libre
- Sensible à l'incertitude sur les paramètres hydrodynamique des substrats

Résultat - Flux hydriques cumulés

Condition limite aval

Scénario d'ETP

% de couvert végétal



05. Conclusion

Principaux résultats

D'après les travaux expérimentaux

- L'intrusion d'eau souterraine peu profonde peut totalement compromettre la performance des jardins de pluie
- SC sans intrusion = 63 % de réduction du ruissellement
- 10 cm de couche de gravier en fond augmentent significativement le taux d'exfiltration même pour un sous-sol à faible perméabilité (0,2 mm/h)
- Pour les systèmes étanchéifiés, l'IWS augmente l'ET : +153 %

D'après la modélisation

- Le bilan hydrique à long terme est bien simulé ; PAS sensible à l'incertitude des paramètres (à vérifier pour d'autres HLR).
- La dynamique des teneurs en eau en temps sec est mal reproduite.
- La teneur en eau modélisée est très sensible aux conditions aux limites.

Implications pour la conception

Comment la conception et le contexte →
influencent la performance ?

Caractéristiques des substrats et HLR

- Des substrats plus fins peuvent aider à retenir l'humidité et soutenir l'ET sous faible HLR
- Des substrats excessivement fins (limon) ont entraîné du colmatage, des écoulements préférentiels (sans IWS) ou une mise en eau excessive (avec IWS)
- Assurer une distribution homogène de l'eau pour un faible HLR peut être difficile → réduction potentielle de l'ET et risque de stress hydrique

Végétation

- Les traits de végétation ont un impact mineur sur le bilan hydrique modélisé pour les cas testés (caractérisés par une sécheresse limitée)
- Mais adapter les plantes aux régimes d'humidité du sol est nécessaire pour la santé de la végétation à long terme



Merci

Tinghao HUANG

tinghao.huang@enpc.fr