



Conséquences hydrologiques d'une généralisation de l'infiltration des eaux pluviales à l'échelle de petits bassins versants urbains en contexte de nappe peu profonde

William Pophillat, Jérémie Sage, Fabrice Rodriguez, Isabelle Braud

L'infiltration à la source des eaux pluviales

- Des aménagements perméables et végétalisés, avec des conceptions relativement simples
- Souvent, le moyen le plus efficace de réduire les apports au réseau, au moins pour les événements fréquents
- Bénéfices attendus:
 - En premier lieu: maîtrise des flux d'eau et de polluants associés
 - Plus largement: renaturation du cycle de l'eau (davantage de recharge et d'évapotranspiration)
 - Mais aussi: contribution au rafraîchissement, aménités paysagères, support de biodiversité...



Contexte

Etat des connaissances (fonctionnement hydrologique)

A l'échelle de l'ouvrage:

- Fonctionnement et dimensionnement assez bien maîtrisés
- En contexte de nappe peu profonde, surélévation localisée de la nappe → possible réduction des performances

Dans le cas d'un déploiement à plus grande échelle:

- Effet global $\neq \sum$ effets individuels (en particulier si interactions des ouvrages avec une nappe peu profonde)
- Principaux impacts documentés:
 - Hausse des niveaux de nappe
 - Des effets contrastés sur les débits de base
 - Augmentation des infiltrations parasites dans les réseaux

Contexte

Etat des connaissances (fonctionnement hydrologique)

A l'échelle de l'ouvrage:

- Fonctionnement et dimensionnement assez bien maîtrisés
- En contexte de nappe peu profonde, surélévation localisée de la nappe → possible réduction des performances

Dans le cas d'un déploiement à plus grande échelle:

- Effet global $\neq \sum$ effets individuels (en particulier si interactions des ouvrages avec une nappe peu profonde)
- Principaux impacts documentés:
 - Hausse des niveaux de nappe
 - Des effets contrastés sur les débits de base
 - Augmentation des infiltrations parasites dans les réseaux

Limites des connaissances actuelles

- Des observations souvent réduites aux débits en réseau ou dans les cours d'eau
- Une majorité de travaux de modélisation ne rendant pas pleinement compte des interactions nappe-ouvrages
- Des résultats associés à des cas d'étude spécifiques (difficulté à généraliser)

Objectif

Préciser les facteurs gouvernant la réponse hydrologique d'un bassin versant à une infiltration systématique des pluies courantes

Questions associées

- Incidence du contexte local ?
- Mécanismes dominants ?
- Possibilité d'adapter la stratégie d'infiltration ?
- Rôle des interactions entre volumes infiltrés, nappe et milieu urbain ?

Exemple de « facteurs » : climat, hydrogéologie, tissu urbain, degré de concentration de l'infiltration...

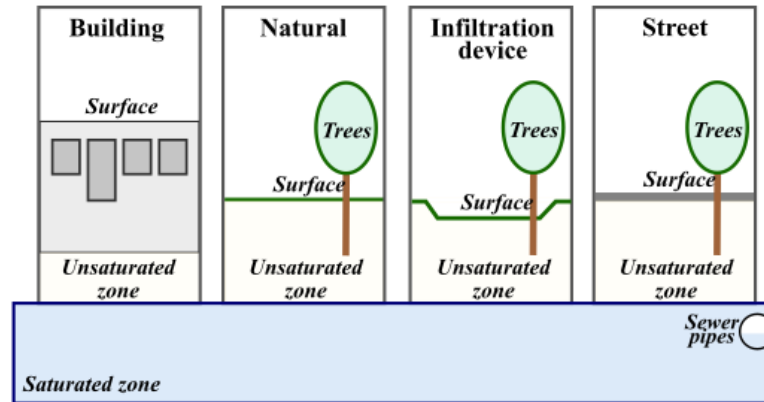


- Analyse numérique basée sur le modèle URBS
- Focus sur l'échelle de petits bassins versants urbains (BV) et sur des contextes de nappe « peu profonde »

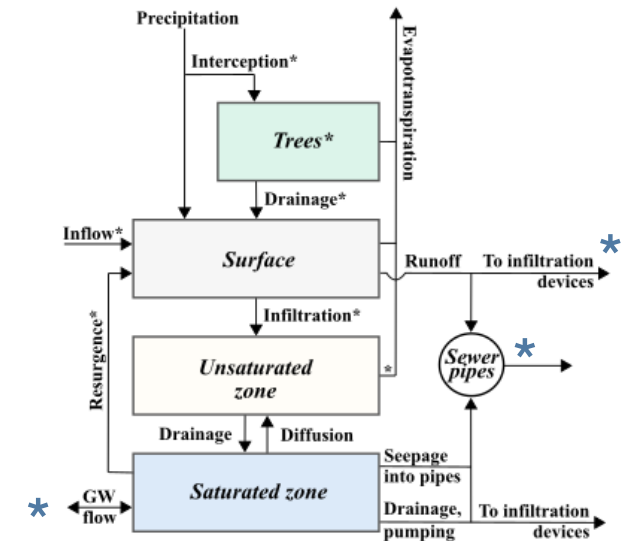
Méthodologie

Le modèle URBS (Rodriguez et al, 2008; Pophillat et al, 2022)

Représentation des processus
sur des unités spatiales (m² à
quelques centaines de m²)



*Différents profils d'occupation
du sol*



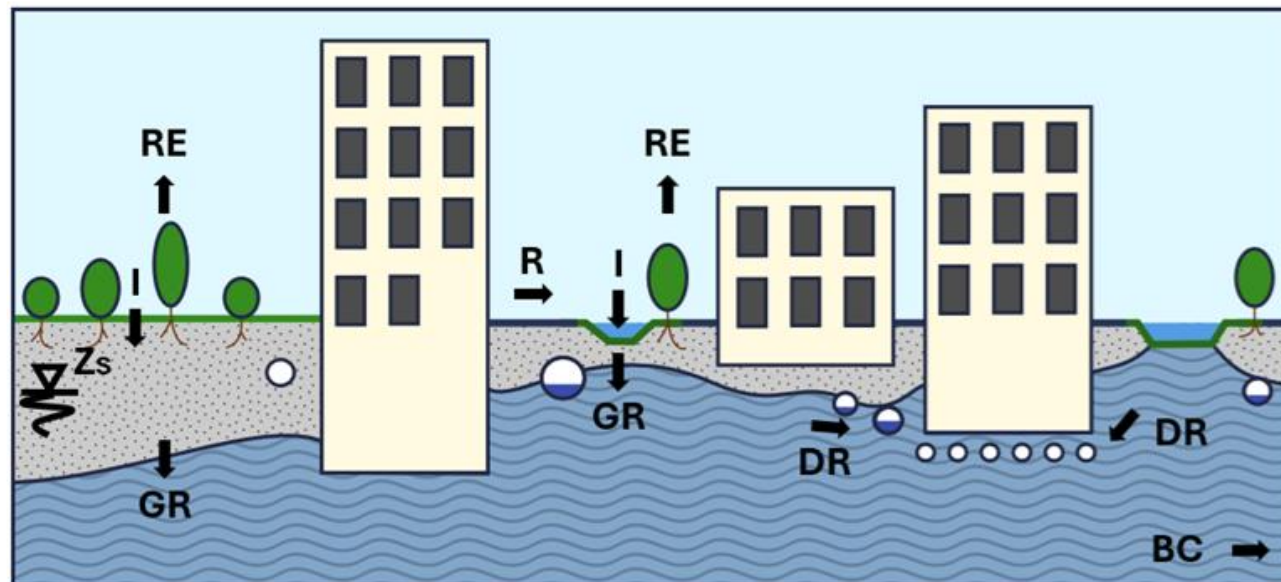
*Différents compartiments et flux
associés*

***Transferts « horizontaux » (entre unités ou vers les exutoires):** écoulements de surface, transferts via le réseau d'assainissement, écoulements de la nappe

Méthodologie

Démarche générale

- **Modélisation** d'un secteur de 500×500m (sur 4 années au pas de temps 6-min) → bilan hydrologique et niveaux de nappe
- **Multitude de scénarios** (variations systématiques de différents facteurs liés au contexte ou à la stratégie d'infiltration)
- **3 familles de scénarios**: « avec infiltration », « avec urbanisation mais sans infiltration », « sans urbanisation » (références)



Infiltration (I), ruissellement en surface (R), transpiration depuis le sol (RE), drainage par les infrastructures souterraines (DR), recharge de la nappe (GR), écoulement souterrain vers l'aval (BC), stock d'eau dans la nappe et niveau moyen Z_s

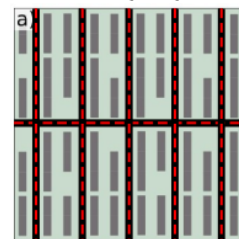
Méthodologie

Démarche générale

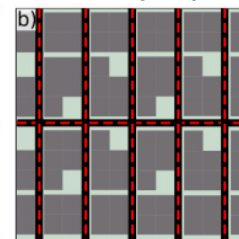
- **Modélisation** d'un secteur de 500×500m (sur 4 années au pas de temps 6-min) → bilan hydrologique et niveaux de nappe
- **Multitude de scénarios** (variations systématiques de différents facteurs liés au contexte ou à la stratégie d'infiltration)
- **3 familles de scénarios**: « avec infiltration », « avec urbanisation mais sans infiltration », « sans urbanisation » (références)

Contexte urbain

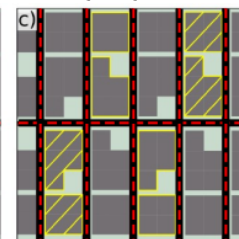
Résidentiel (RES)



Commercial (COM)



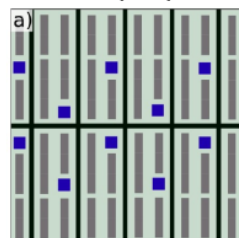
Dense (DEN)



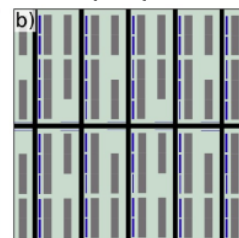
×

Stratégie d'implantation des ouvrages

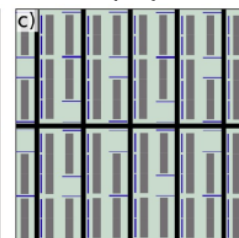
Centralisé (CEN)



Médian (MED)



Distribué (DIS)



■ Espaces verts

■ Voirie

■ Fondations

■ Batiments

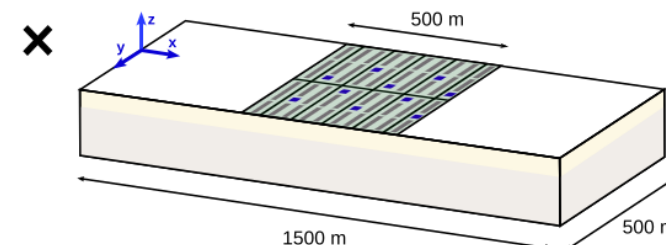
--- Réseaux

■ Systèmes de drainage

■ Ouvrages d'infiltration : capacité correspondant à 10 mm de pluie; facteur de charge (rapport entre surface d'infiltration et surface d'apport) de 2 ou 10%

Contexte hydrogéologique

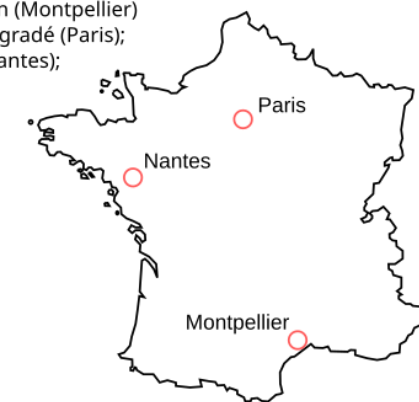
Sol de surface et sous-jacent plus ou moins perméable (×9);
profondeur de nappe (×3); pente du substratum (×3); facteurs
liés aux conditions aux limites (×4)



Climat

Méditerranéen (Montpellier)
Océanique dégradé (Paris);
Océanique (Nantes);

×



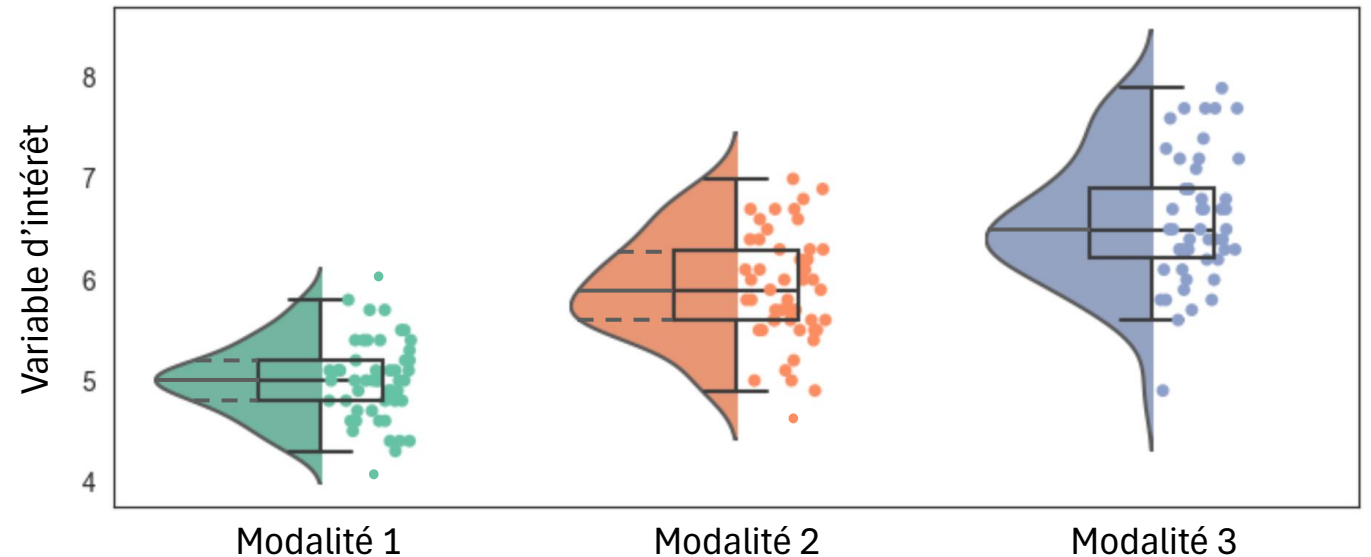
Méthodologie

Analyse des résultats

~ **30 000 simulations**, correspondant à différentes configurations, et avec plusieurs variables hydrologiques à analyser (ex: niveau de nappe moyen)

Outils mobilisés

- Tests statistiques pour identifier les facteurs ayant le plus d'influence sur une variable donnée
- Visualisation de la distribution des variables en fonction des facteurs (diagramme violon, cf. ci-contre)

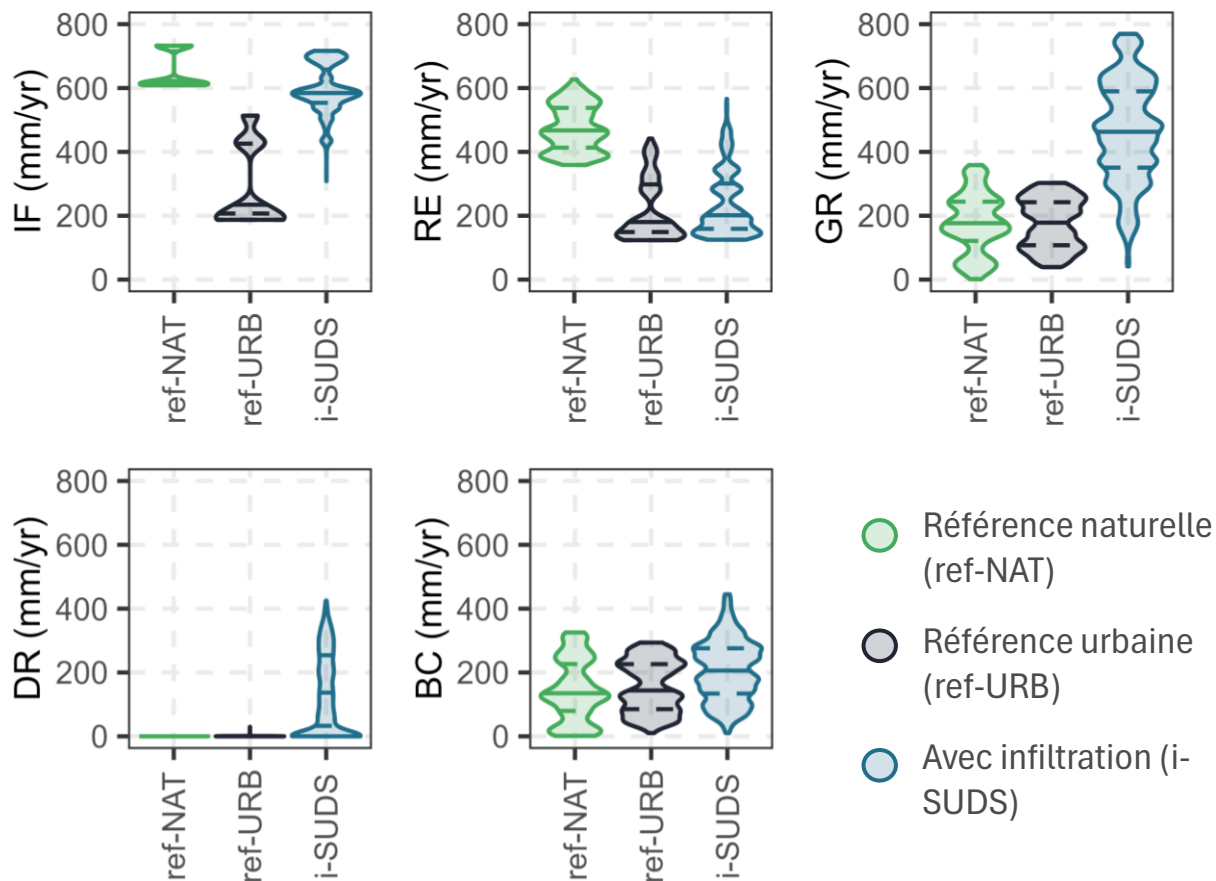


La largeur du fuseau reflète la fréquence des observations autour d'une valeur donnée; les traits horizontaux donnent respectivement la médiane et les quartiles

Résultats

Impact de l'infiltration des EP sur le bilan hydrologique du BV

- Rétablissement de l'infiltration (IF) à des niveaux proches de la référence naturelle
- Accroissement limité de la transpiration (RE), qui reste proche de la référence urbaine
- Elévation significative de la recharge (GR), avec une forte variabilité des valeurs simulées
- Retour d'une partie de l'eau infiltrée vers le réseau via les interactions avec les infrastructures souterraines (DR)
- Accroissement possible des écoulements souterrains vers l'aval (BC)

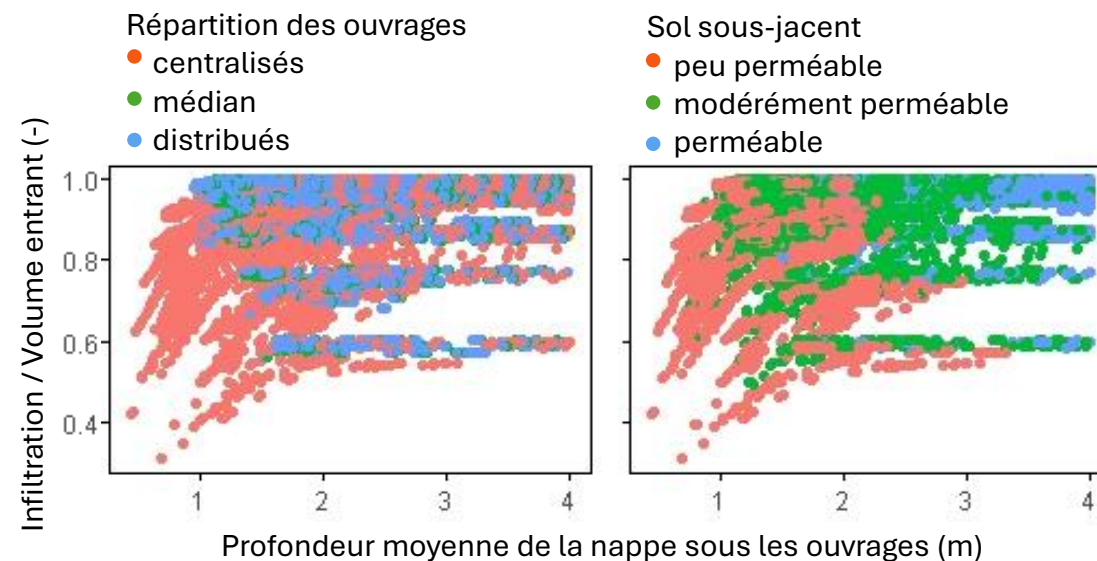


Résultats

L'augmentation des volumes infiltrés

- Comme attendu, des volumes infiltrés en premier lieu contrôlés par :
 - Les facteurs directement liés au ruissellement (contexte urbain, via l'imperméabilisation, et climat)
 - Et ceux contrôlant directement la capacité des ouvrages à infiltrer (facteur de concentration, perméabilité du sol en surface)
- Mais aussi, un effet notable de la répartition spatiale des ouvrages et de la perméabilité du sol sous-jacent (au-delà de 1 m)

➡ Interactions avec la nappe



Incidence de la profondeur moyenne de la nappe sous les ouvrages sur l'efficacité de ces derniers (proportion du volume reçu infiltré dans l'ouvrage)

Résultats

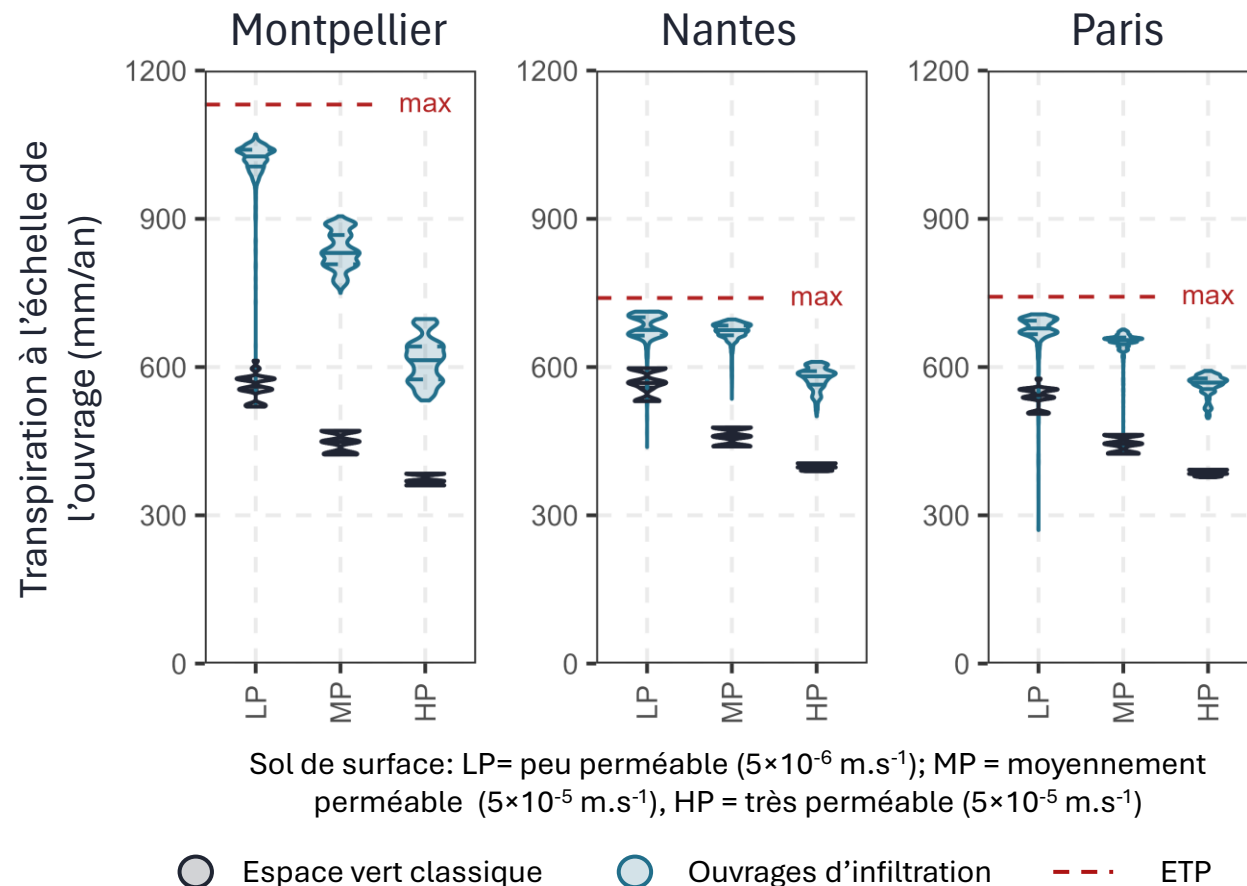
La transpiration dans les ouvrages d'infiltration

A l'échelle de l'ouvrage:

- Des valeurs nettement supérieures à celles d'espaces verts classiques¹...
- ...déterminées par le climat (demande atmosphérique) et la perméabilité du sol de surface (rétention)

A l'échelle du BV: une contribution dans tous les cas minime (+8 mm/an en moyenne après infiltration)

(¹Espaces verts à l'emplacement des ouvrages dans le scénario de référence urbain)

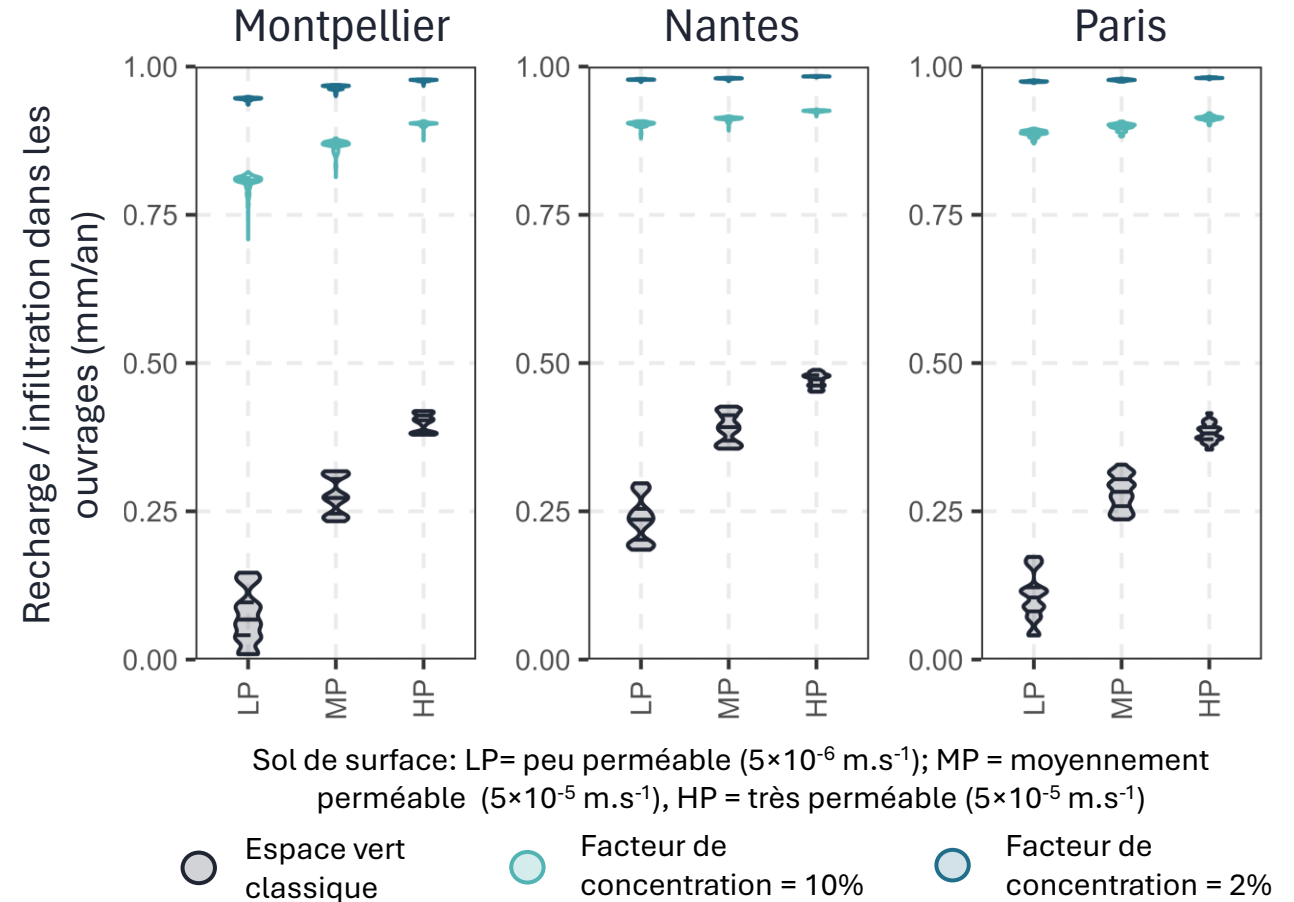


Résultats

Comprendre les impacts de l'infiltration sur la recharge

- Un accroissement de la recharge contrôlé par les mêmes facteurs que ceux contrôlant l'infiltration et la transpiration
- Proportion du volume infiltré dans les ouvrages contribuant à la recharge :
 - Rôle déterminant du facteur de concentration¹, de la nature du sol, et du climat
 - Dans tous les cas, des valeurs très nettement supérieures de celles d'un espace vert classique

⁽¹⁾Rapport entre surface d'infiltration et surface d'apport revêtue)

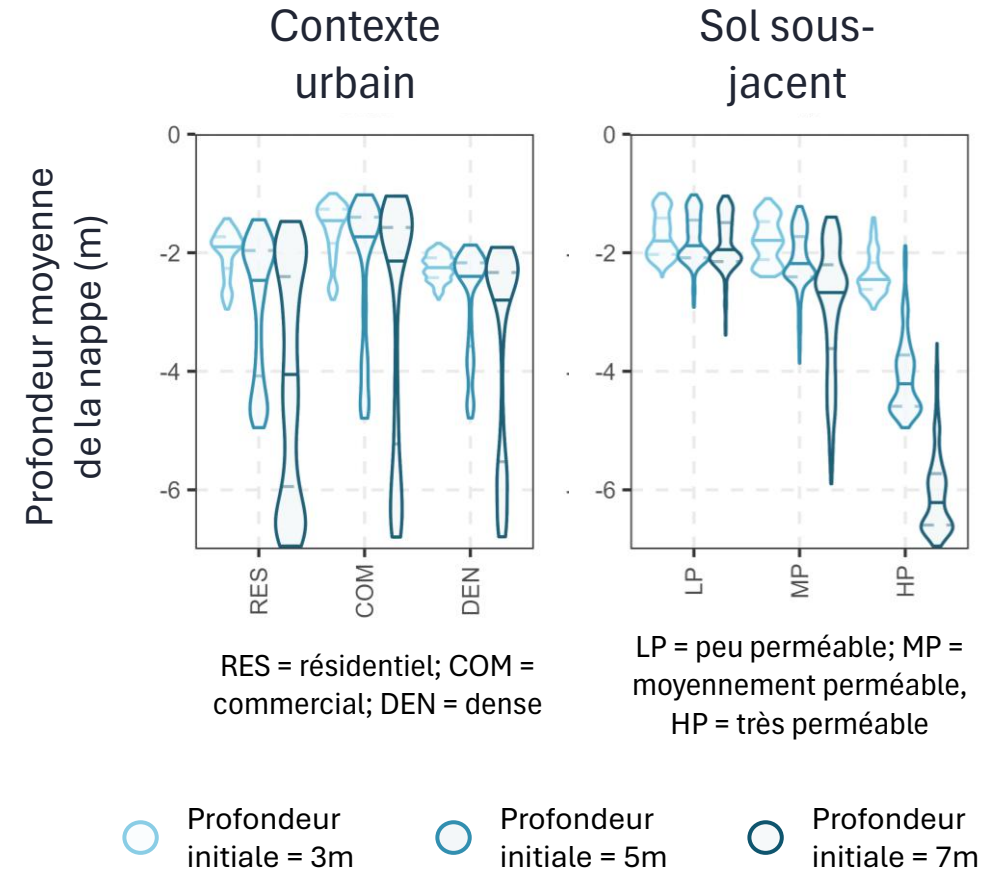


Résultats

Incidence sur les niveaux de nappe

- Des élévations des niveaux moyens (temps et espace) parfois très marquées (plusieurs mètres dans un certain nombre de simulations)
- Principaux facteurs:
 - Profondeur initiale de la nappe
 - Contexte urbain → effet des infrastructures souterraines et du volume infiltré
 - Sol sous-jacent (au-delà de 1 m) → effet de la transmissivité de l'aquifère

(+ Variabilités spatiale et temporelle accrue – non montrées ici)



Résultats

Contribution de la recharge additionnelle au bilan hydrologique

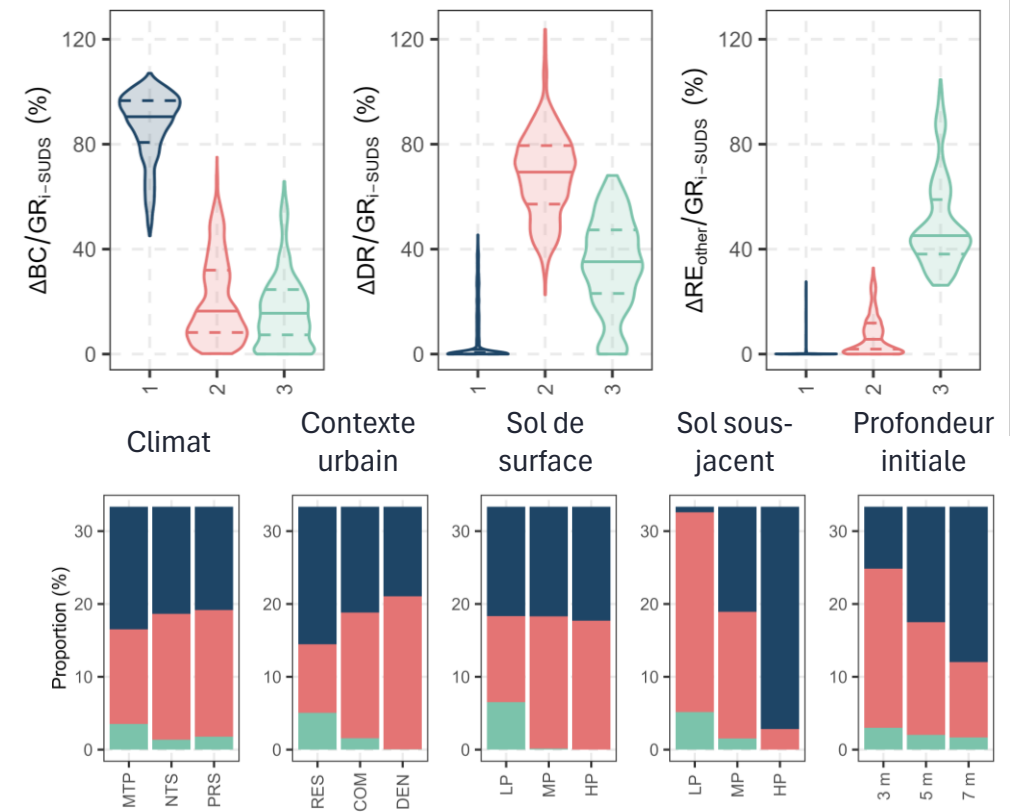
Classement des configurations selon trois groupes¹:

- 1 Augmentation de l'écoulement souterrain vers aval (ΔBC): sous-sols très perméables, niveaux de nappe initialement faibles
- 2 Accroissement du drainage par les infrastructures souterraines (ΔDR): sous-sols moins perméables, perméabilités de surface modérées à fortes, niveaux de nappe initialement hauts, imperméabilisation importante
- 3 Accroissement de la transpiration en dehors des ouvrages (ΔRE_{other}): sols de surface et sous-sols peu perméables, imperméabilisation limitée, ETP élevée, niveaux de nappe initialement élevés

Dans tous les cas: un effet limité des facteurs liés à la stratégie d'implantation des ouvrages

(¹Hierarchical Clustering on Principal Components)

Bilan souterrain en % de la recharge dans les ouvrages (GR_{i-suds})



Conclusions

Conséquences d'une systématisation l'infiltration à la source

- Un accroissement très net de la recharge, mais avec des conséquences variables
- Le plus souvent, une augmentation significative des niveaux de nappe (pas nécessairement problématique)
- Attention à porter aux contextes moins perméables (aquifères peu transmissifs) ; une partie de l'eau infiltrée peut se retrouver dans les réseaux (+ impacts éventuels sur le bâti)
- Incidence limitée de la stratégie d'implémentation des ouvrages d'infiltration (mais infiltration diffuse à privilégier pour limiter les interactions avec la nappe, maximiser l'évapotranspiration et les performances)

Pour tendre vers un bilan hydrologique plus « naturel »

- Limiter l'imperméabilisation, et à défaut combiner l'infiltration à des pratiques de limitation du ruissellement via l'évapotranspiration (toitures végétalisées)
- Possibilité de mobiliser la ressource souterraine à proximité des ouvrages pour d'autres usages (existants) ?

Perspectives

- Tester des scénarios intermédiaires de déploiement de l'infiltration, éventuellement en combinaison avec d'autres ouvrages
- Comportement pour des événements exceptionnels ? (en lien avec les risques ruissellement et remontée de nappe)
- Mieux comprendre le rôle des hétérogénéités du sous-sol non représentées dans le cadre de ce travail → *Poursuivre l'évaluation du modèle par comparaison à des observations*
- Dans le cadre de ce travail, une base de données de résultats simulations avec de multiples configurations → *Vers des outils opérationnels (ex: fiches de synthèse, arbre de décision...) pour mieux anticiper les impacts de l'infiltration et adapter la stratégie de gestion des eaux pluviales en fonction du contexte local ?*

Références:

W. Pophillat, Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle de petits bassins versants urbains et péri-urbains – Apports de la modélisation intégrée, Thèse de l'Université Grenoble Alpes

J. Sage, W. Pophillat, F. Rodriguez, I. Braud. Untangling the Factors Governing the Catchment-Scale Impacts of On-Site Stormwater Infiltration in Shallow Groundwater Contexts. Journal of the American Water Resources Association, 2026, 62 (1),

W. Pophillat, J. Sage, F. Rodriguez, I. Braud. Consequences of interactions between stormwater infiltration systems, shallow groundwater and underground structures at the neighborhood scale. Urban Water Journal, 2022, 19 (8)

W. Pophillat, J. Sage, F. Rodriguez, I. Braud. Dealing with shallow groundwater contexts for the modelling of urban hydrology – A simplified approach to represent interactions between surface hydrology, groundwater and underground structures in hydrological models. Environmental Modelling and Software, 2021, 14

Merci de votre attention

Contact: jérémie.sage@cerema.fr