

# CONSÉQUENCES D'UNE SYSTÉMATISATION DES PRATIQUES D'INFILTRATION À LA SOURCE DES PLUIES COURANTES À L'ÉCHELLE DE PETITS BASSINS VERSANTS URBANISÉS

**Apports de la modélisation intégrée**

William Pophillat

Encadrement : Isabelle Braud (INRAE), Fabrice Rodriguez (UGE), Jérémie Sage (Cerema)

## PLAN DE LA PRÉSENTATION

- Contexte et objectifs du travail
- Présentation du modèle URBS et des développements réalisés
- Évaluation du rôle des interactions entre surface et souterrain
- Évaluation de l'influence des caractéristiques du bassin
- Évaluation sur un cas réel

# L'INFILTRATION À LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES

## Dispositifs d'abattement à la source

- Limiter les volumes transmis aux réseaux → abattement en amont
- Dispositifs variés : noues, bassins, tranchées drainantes, ouvrages enterrés, ...
- Objectifs associés : maîtrise du ruissellement (quantitatif et qualitatif) et plus récemment recharge des nappes, accroissement de l'évapotranspiration, ...



Tranchée drainante (Sage, 2016)

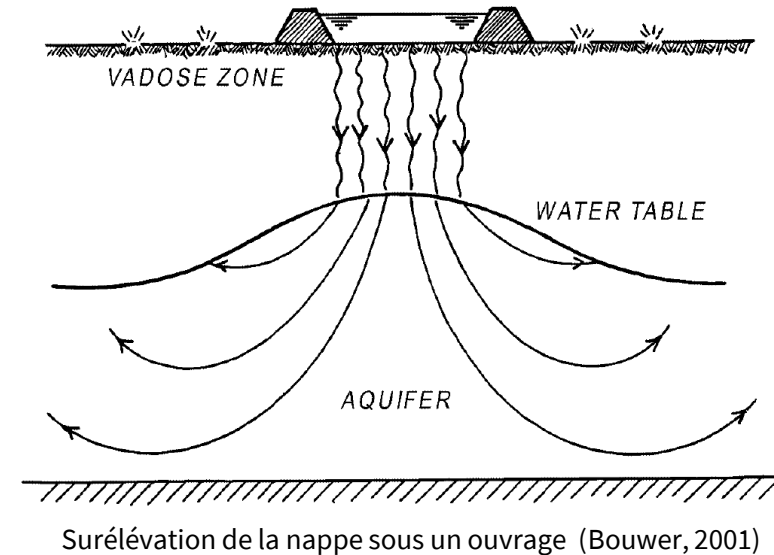


Noue (Sage, 2016)

# L'INFILTRATION À LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES

## Effets à l'échelle de l'ouvrage

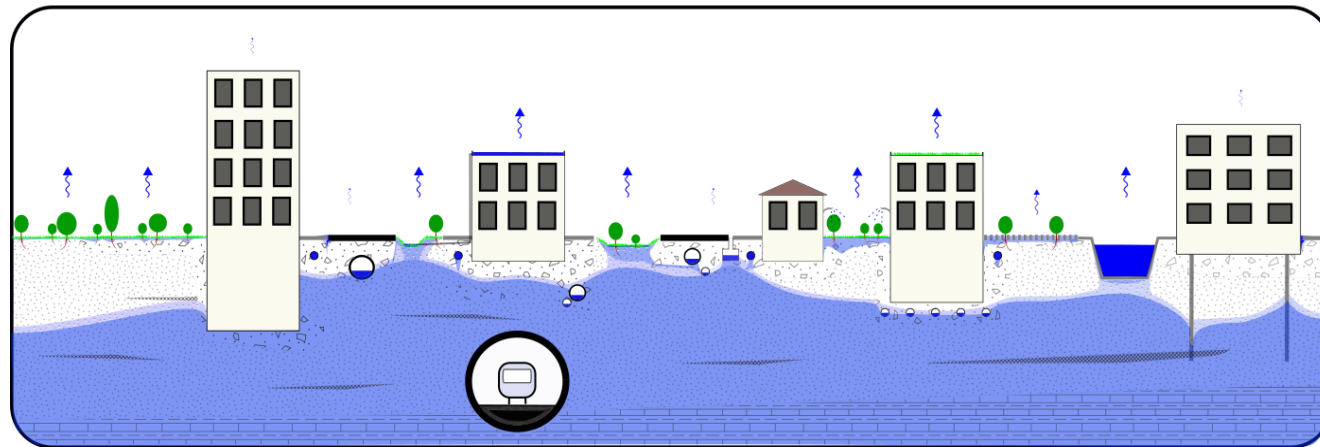
- Capacité à maîtriser le ruissellement (Bonneau et al., 2017)
- Faible proportion d'évapotranspiration (Hamel et al., 2011) → favorise l'infiltration profonde
- Surélévation de la nappe sous les ouvrages :
  - Facteurs d'influence : concentration spatiale, perméabilité du sol, profondeur de la nappe, épaisseur saturée (Nimer et al., 2009)
  - Susceptible d'affecter les performances de l'ouvrage (Locatelli et al., 2015)



# L'INFILTRATION À LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES

## Effets à l'échelle du quartier ou de la ville

- Capacité à maîtriser le ruissellement (Petrucci et al., 2013)
- Risque d'introduire une recharge excessive (Göbel et al., 2004)
- Risque de résurgences (Locatelli et al. 2017), d'augmentation des volumes d'eaux souterraines drainés par les réseaux (Kidmose et al., 2015)
- Incertitude sur le devenir des eaux infiltrées (Bonneau et al., 2017)

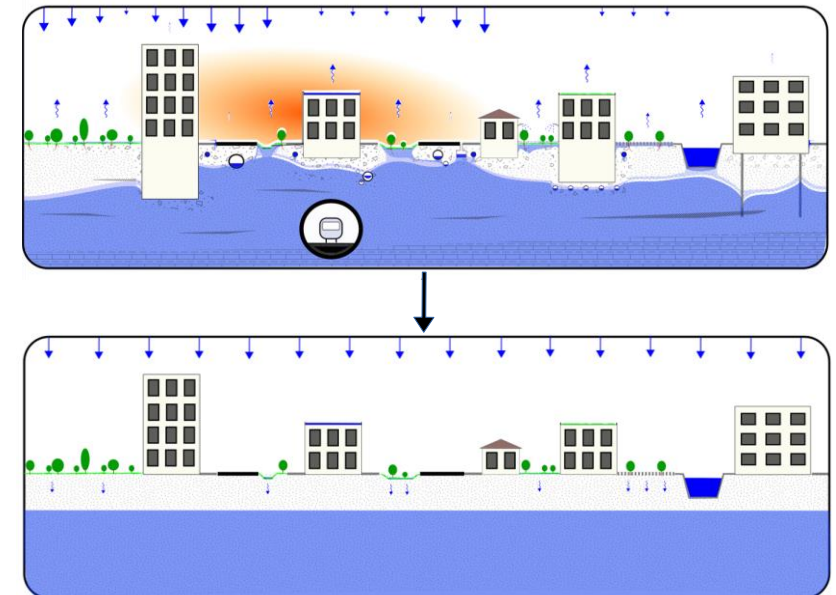


Fonctionnement hydro(geo)logique d'une zone urbaine

# L'INFILTRATION À LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES

## Modélisation des effets à l'échelle du bassin

- Outil central : permet de tester différents scénarios
- Outils sophistiqués pour la représentation de la surface ou du souterrain
  - peu de modèles couplant les deux compartiments
- Des questions sur l'influence du compartiment souterrain :
  - Influence des simplifications de représentation
  - Méconnaissance de la composition



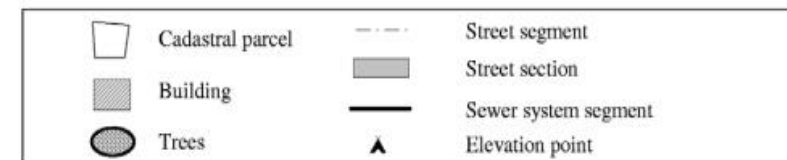
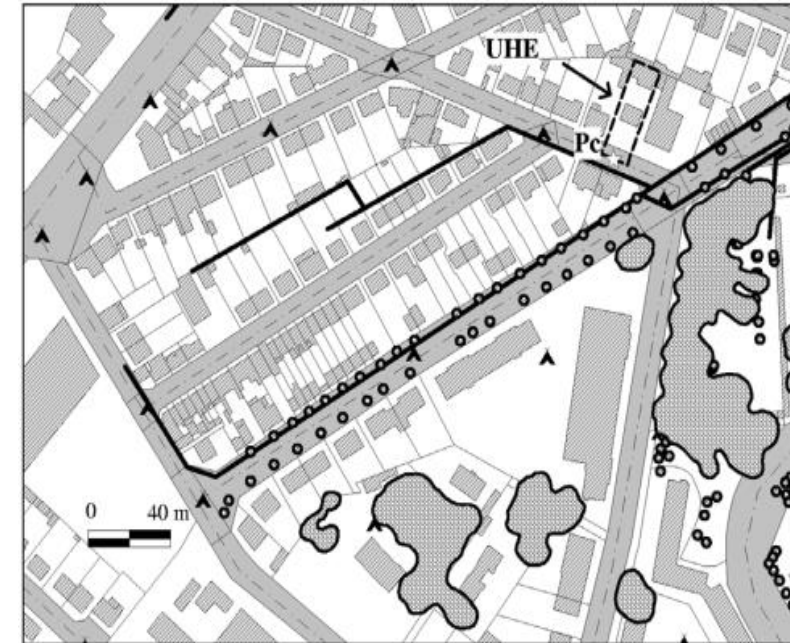
Simplifications réalisées pour la modélisation

## OBJECTIFS DU TRAVAIL DE THÈSE

1. Préciser les facteurs gouvernant la réponse hydrologique du bassin à une infiltration systématique des pluies courantes
  - Caractéristiques du bassin (contexte hydrogéologique, climatique, occupation des sols)
  - Caractéristiques des stratégies d'infiltration
  - Interactions locales entre flux infiltrés, nappe superficielle et milieu urbain
  
2. Dégager des enseignements pour la modélisation de bassins versants urbanisés soumis à des stratégies de gestion à la source des eaux pluviales

# PRÉSENTATION DU MODÈLE URBS (URBAN RUNOFF BRANCHING STRUCTURE)

- Initialement développé à l'IFSTTAR (Morena, 2004 ; Rodriguez et al., 2008)
- Modèle hydrologique distribué dédié au milieu urbain
- Simulation continue - pas de temps fin (5 min)
- Découpage spatial suivant les parcelles cadastrales
- Échelle spatiale : quartier à petits bassins

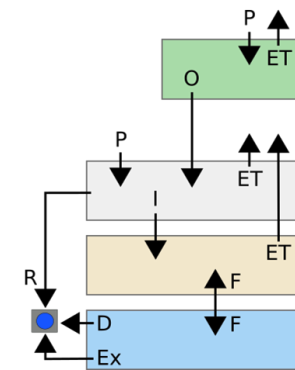
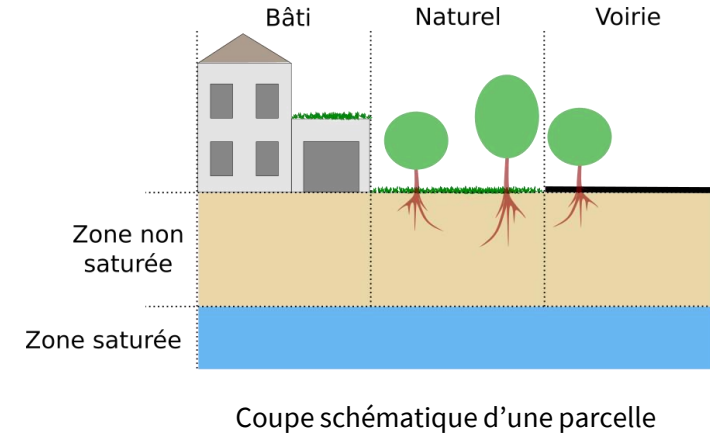


Exemple de plan cadastral - éléments exploités dans URBS (Rodriguez et al., 2008)



# PRÉSENTATION DU MODÈLE URBS (URBAN RUNOFF BRANCHING STRUCTURE)

- Sur chaque parcelle :
  - Calcul par profil d'occupation des sols : naturel, bâtiment, voirie, ouvrage de gestion des eaux pluviales
  - 4 réservoirs superposés : arbres, surface, zone non saturée, zone saturée
  
- Ruissellement transféré à l'exutoire via les voiries et les conduites enterrées
  
- Représentation simplifiée du sol et des écoulements souterrains

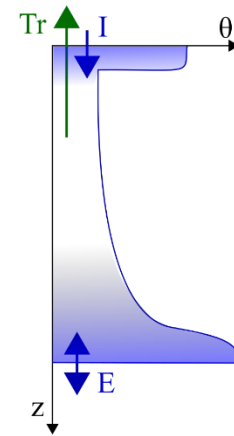


Calcul des flux sur les profils en utilisant 4 réservoirs superposés

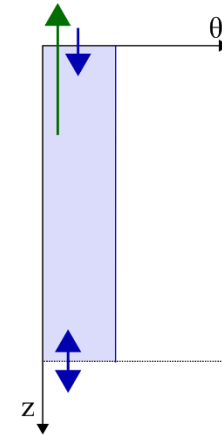
# DÉVELOPPEMENTS RÉALISÉS DANS LE CADRE DE LA THÈSE

## Description du sol et de la zone non saturée

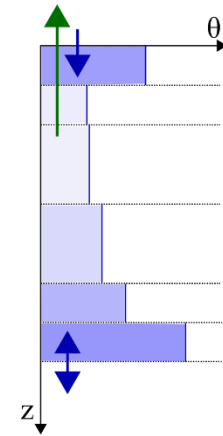
- Prise en compte de l'hétérogénéité du sol
  - Sols homogènes verticalement – stratifiés - avec substratum
  - Possibilité de faire varier le sol entre les parcelles
- Description du profil de teneur en eau et de l'estimation des flux qui en dépendent



Profil de teneur en eau et flux en dépendant



Simplification avec un unique reservoir

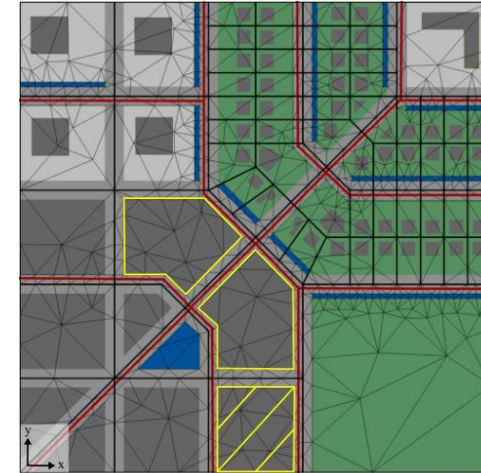


Simplification avec multiples reservoirs

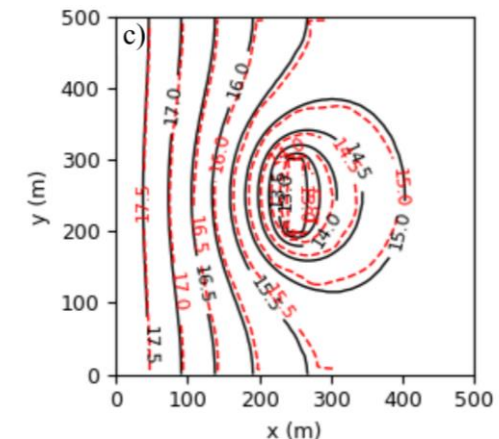
# DÉVELOPPEMENTS RÉALISÉS DANS LE CADRE DE LA THÈSE

## Écoulements de nappe et interactions avec les structures souterraines

- Consolidation du calcul des écoulements de nappe
  - Mode de calcul adapté aux formes irrégulières
  - Possibilité de raffiner le maillage en souterrain
  
- Consolidation du calcul des interactions nappe/structures et ajout de nouvelles structures :
  - Réseaux
  - Puits
  - Fondations drainées ou imperméables



Exemple de découpage souterrain des parcelles en éléments triangulaires

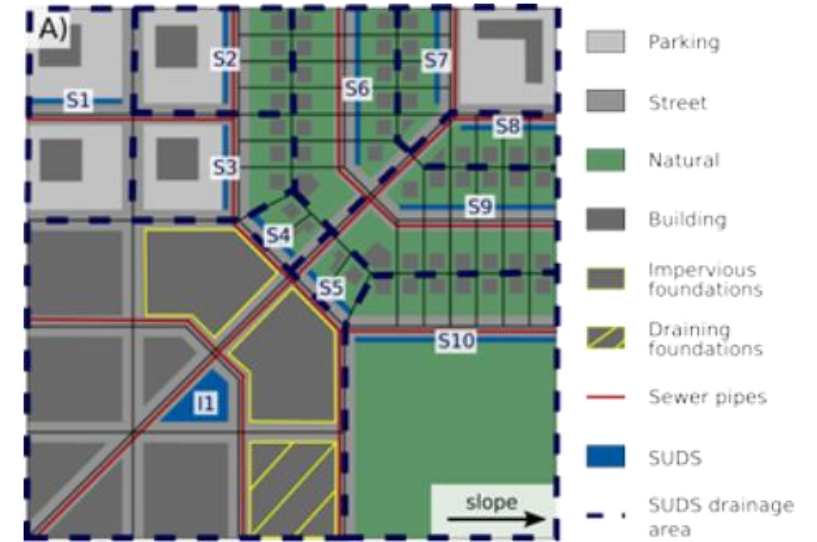


Niveaux de nappe autour d'un bâtiment drainé (URBS (rouge) – Feflow (noir))

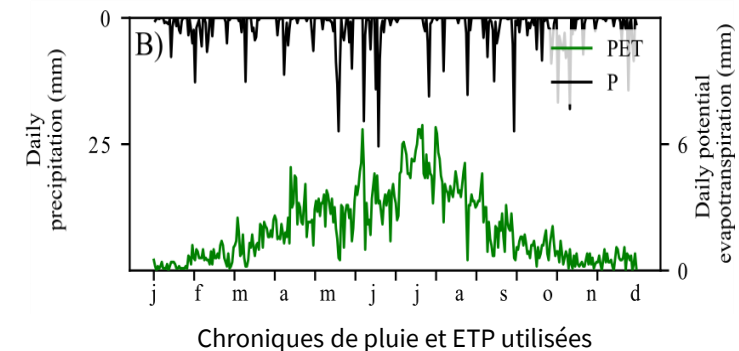
# RÔLE DES INTERACTIONS ENTRE COMPARTIMENTS DE SURFACE ET SOUTERRAIN

## Méthode

- Secteur urbain théorique
- Nappe faiblement profonde (3 m)
- Utilisation de scénarios
  - Avec ou sans ouvrages d'infiltration
  - Différents types de sol
  - Différentes structures souterraines
- Simulation sur un an : chronique de pluie et ETP (Trappes - 2013)



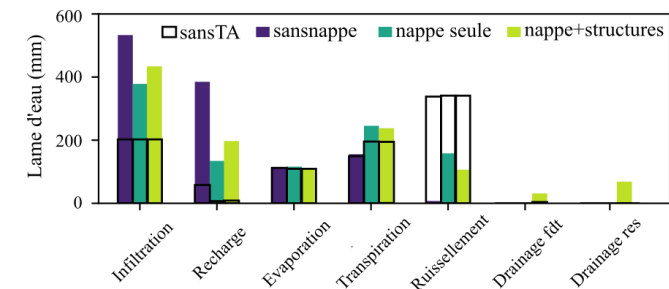
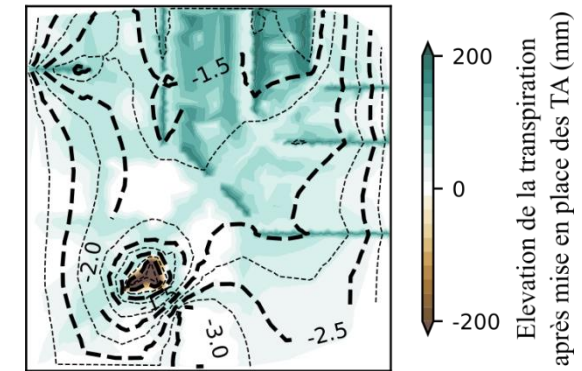
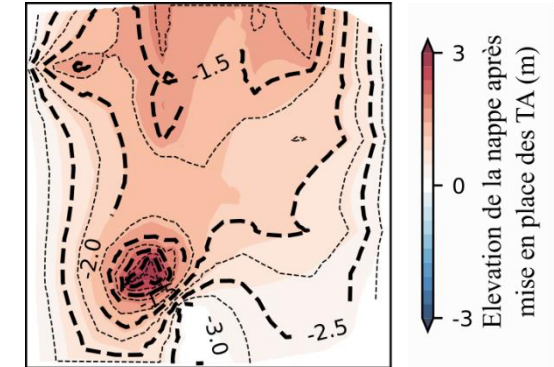
Vue en plan du secteur modélisé – occupation des sols, ouvrages souterrains et ouvrages d'infiltration



# RÔLE DES INTERACTIONS ENTRE COMPARTIMENTS DE SURFACE ET SOUTERRAIN

## Influence de la nappe sur l'hydrologie de surface

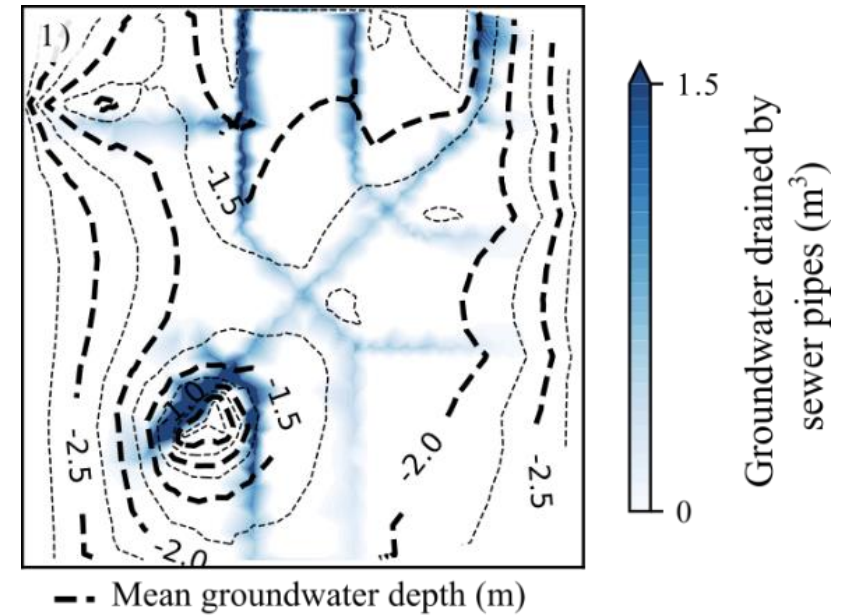
- Infiltration → élévation de la nappe
  - Altération des performances des ouvrages d'infiltration
  - Augmentation de la transpiration sur les secteurs environnants
- Conditionné par les structures souterraines
- Interactions moins marquées pour le sols le plus perméable



# RÔLE DES INTERACTIONS ENTRE COMPARTIMENTS DE SURFACE ET SOUTERRAIN

## Influence de l'infiltration sur les ouvrages souterrains

- Elévation des volumes drainés volontairement (fondations de bâtiments) ou involontairement (infiltration dans les réseaux)
- Augmentation du niveau d'eau au droit des fondations et du différentiel entre amont et aval
- Interactions renforcées à proximité des ouvrages d'infiltration (surélévations de nappe)

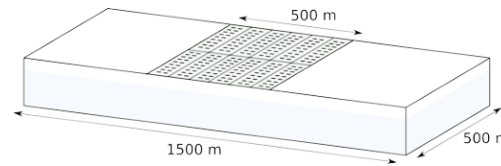


Cumul de l'infiltration dans les réseaux / niveau moyen de la nappe

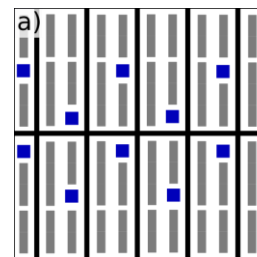
# INFLUENCE DU CONTEXTE SUR LES EFFETS D'UNE INFILTRATION SYSTÉMATIQUE DES EAUX PLUVIALES

## Méthode

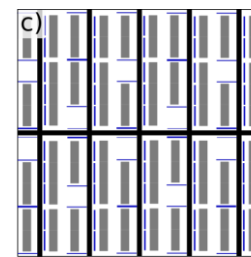
- Secteur urbanisé théorique
- Variation systématique des caractéristiques du bassin
  - Contexte urbain (dense, lotissement, commercial)
  - Type de stratégie : répartition des ouvrages, facteur de concentration
  - Contexte hydrogéologique : sol de surface, aquifère, épaisseur initiale de la ZNS, pente
  - Forçage climatique : couple P/ETP
- Simulation sur 4 années



Domaine modélisé



a) Lotissement avec bassins d'infiltration



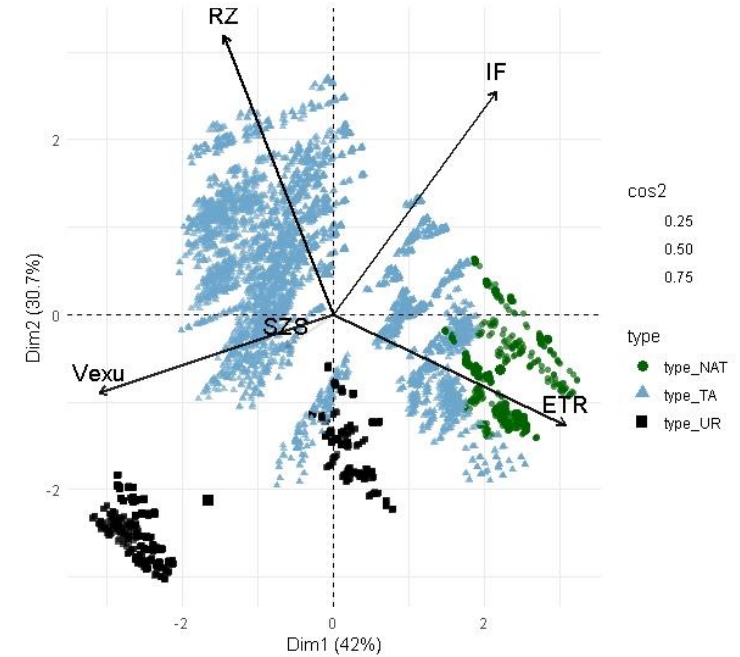
c) Lotissement avec noues

- ~30 000 simulations
- Exemple de variables étudiées :
  - Bilan hydrologique : volumes infiltrés, évapotranspirés, ruisselés, ...
  - Fonctionnement souterrain : échanges entre nappe et zone non-saturée, stock souterrain, volumes drainés par les réseaux, ...
  - En cumulé et en saisonnier

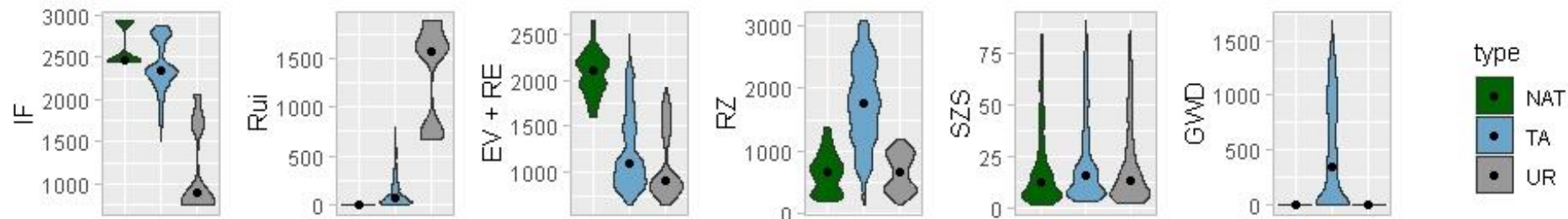
# INFLUENCE DU CONTEXTE SUR LES EFFETS D'UNE INFILTRATION SYSTÉMATIQUE DES EAUX PLUVIALES

## Analyse sur l'ensemble des simulations

- Analyse factorielle sur l'ensemble des simulations
  - Avec infiltration :
    - Forte dispersion des résultats
    - Rétablissement de la composante infiltration
    - Faible accroissement de l'évapotranspiration
- Recharge excessive des aquifères
- Retour au réseau d'une part significative des eaux infiltrées



Répartition des simulations sur le premier plan de l'analyse factorielle suivant le type (naturelle, urbain sans TA, urbain avec TA)



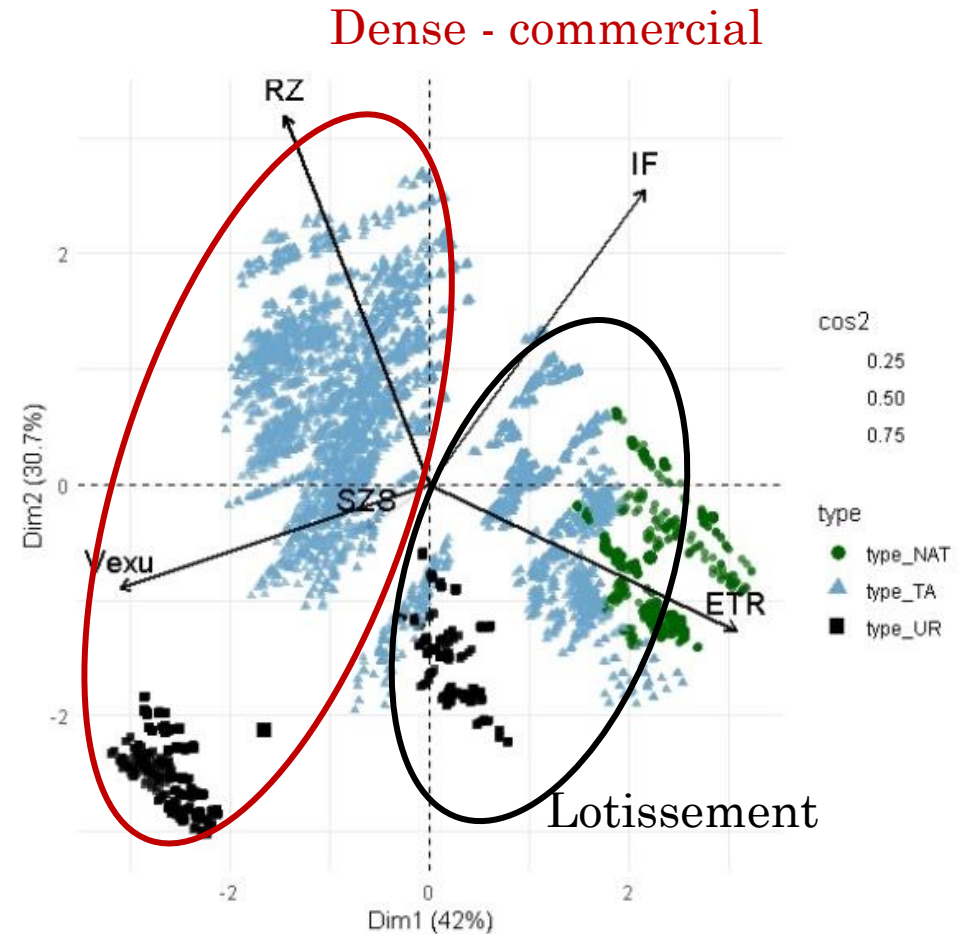
Résultats suivant le type de simulation (naturelle, urbain sans TA, urbain avec TA)



# INFLUENCE DU CONTEXTE SUR LES EFFETS D'UNE INFILTRATION SYSTÉMATIQUE DES EAUX PLUVIALES

## Influence des caractéristiques du bassin

- Influence majeure du climat et du type urbain
- Influence du sol
- Influence moins marquée des autres caractéristiques
- Pour la suite :
  - Saisonnalité des effets
  - Influence des caractéristiques des stratégies

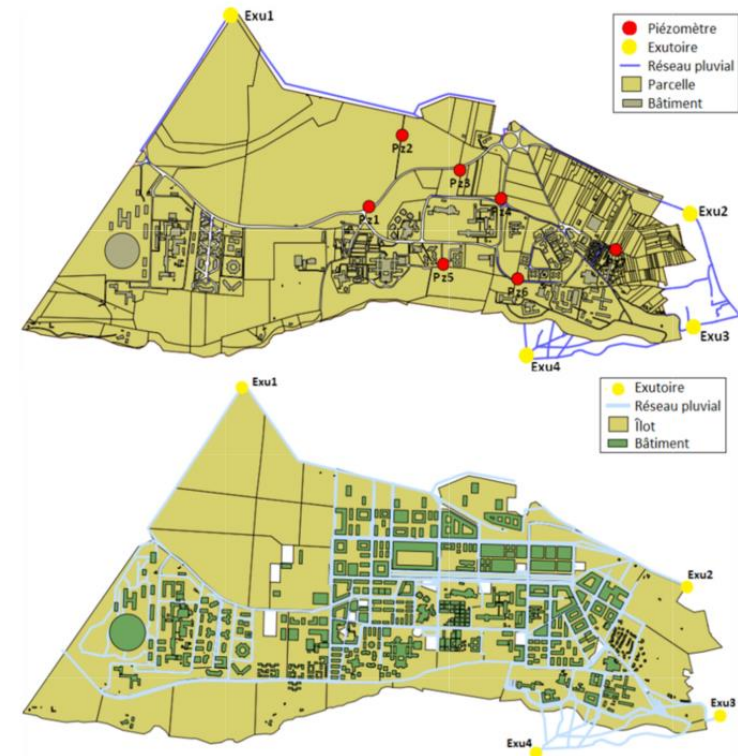


Influence du type urbain sur la variabilité des résultats

# DERNIÈRE ÉTAPE : APPLICATION À LA ZAC DU MOULON

## Description du secteur

- 300ha - Plateau de Saclay
- Gestion à la source des eaux pluviales : noues, bassins, ouvrages enterrés
- Structures souterraines : fondations drainées ou imperméables, réseaux
- Contexte hydrogéologique peu favorable : nappe à faible profondeur, faible perméabilité
- Suivi depuis 2011



Occupation des sols à l'état initial (haut) et futur (bas)

# DERNIÈRE ÉTAPE : APPLICATION À LA ZAC DU MOULON

## Objectifs

- Évaluation du modèle et comparaison avec les précédentes applications
- Exemples d'éléments investigués :
  - Exploitation de données hétérogènes et ponctuelles dans le temps et l'espace sur un domaine en évolution
  - Adéquation complexité du modèle / données à disposition – gestion des incertitudes



Vue aérienne du secteur (source : EPA PS)