

**Yinghao Li**

# Modélisation des processus hydrologiques au sein d'un bassin versant urbain

-

Étude d'un module d'écoulement dans la zone saturée et application au projet urbain du futur campus Paris-Saclay



## THESE CIFRE

Directeur : Fabrice Rodriguez (IRSTV, IFSTTAR)

Co-encadrants : Emmanuel Berthier (CEREMA)  
Antoine du Souich (EPPS)



# Plan

I. Contexte

II. Phase 1: Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation sur le bassin versant du Pin Sec

III. Phase 2: Application sur le projet d'aménagement du Moulon

IV. Conclusion, discussion et perspectives



## I. Contexte

II.1 Paris-Saclay

II.2 Modélisation en hydrologie urbaine

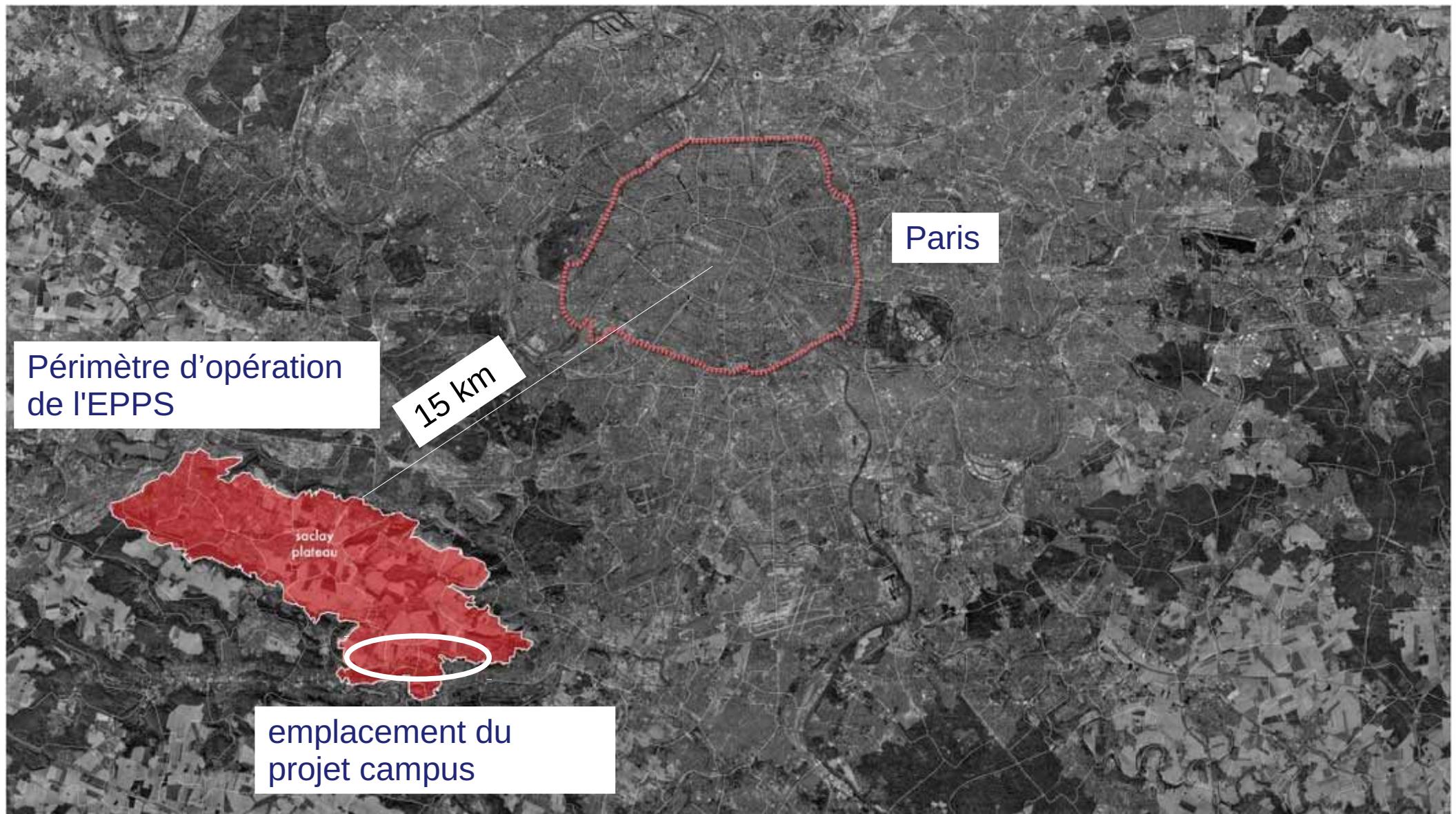
II.3 Objectifs de la thèse

II. Phase 1: Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation sur le bassin versant du Pin Sec

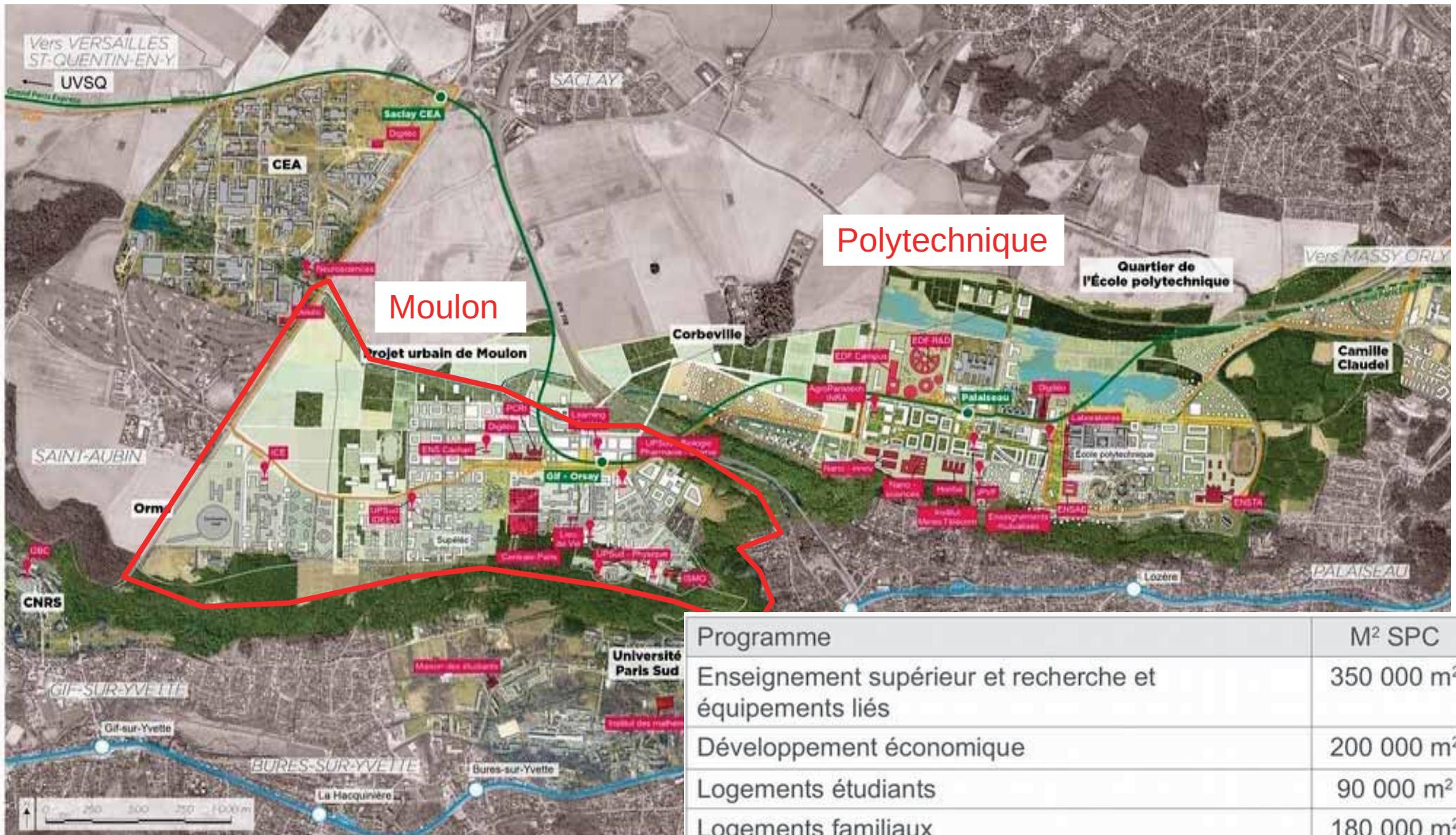
III. Phase 2: Application sur le projet d'aménagement du Moulon

IV. Conclusion, discussion et perspectives

## I.1 Paris-Saclay – projet campus

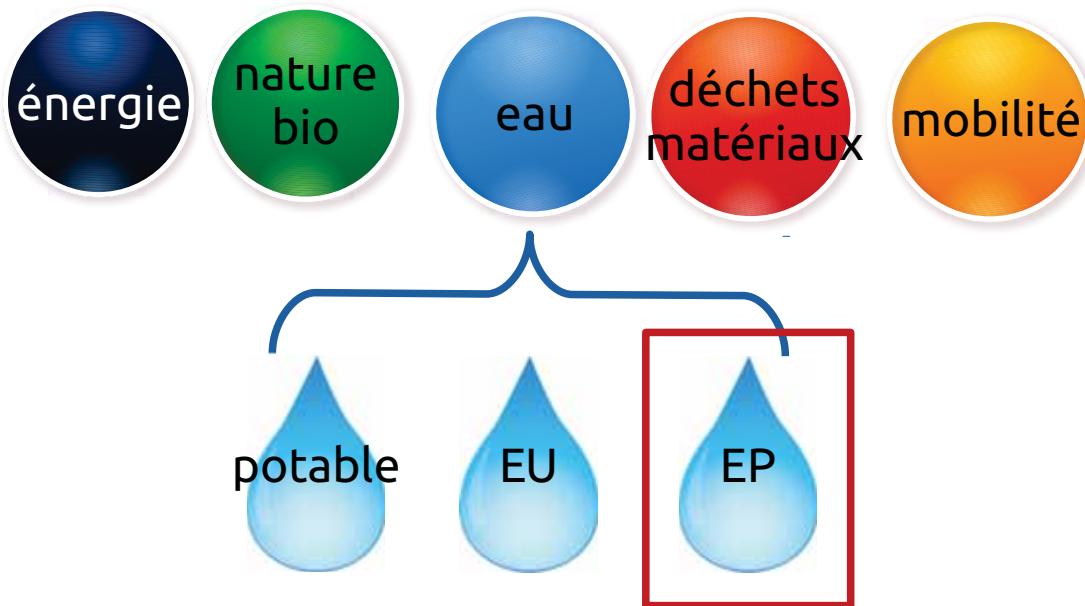


## I.1 Paris-Saclay – projet campus

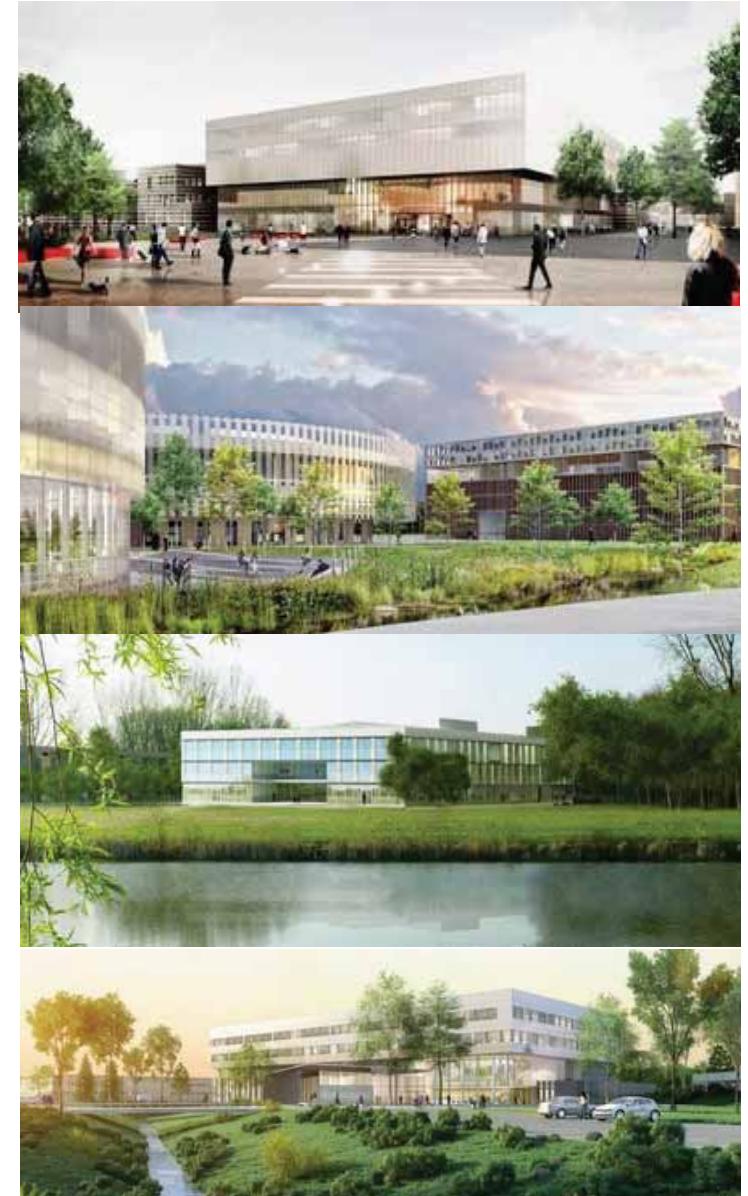


## I.1 Paris-Saclay - ville-campus de demain, approche Écoterritoire

L'environnement au cœur du projet d'aménagement → réflexion Écoterritoire mené avec la CAPS<sup>1</sup>



Étude Globale de Gestion des Eaux (EGGE)

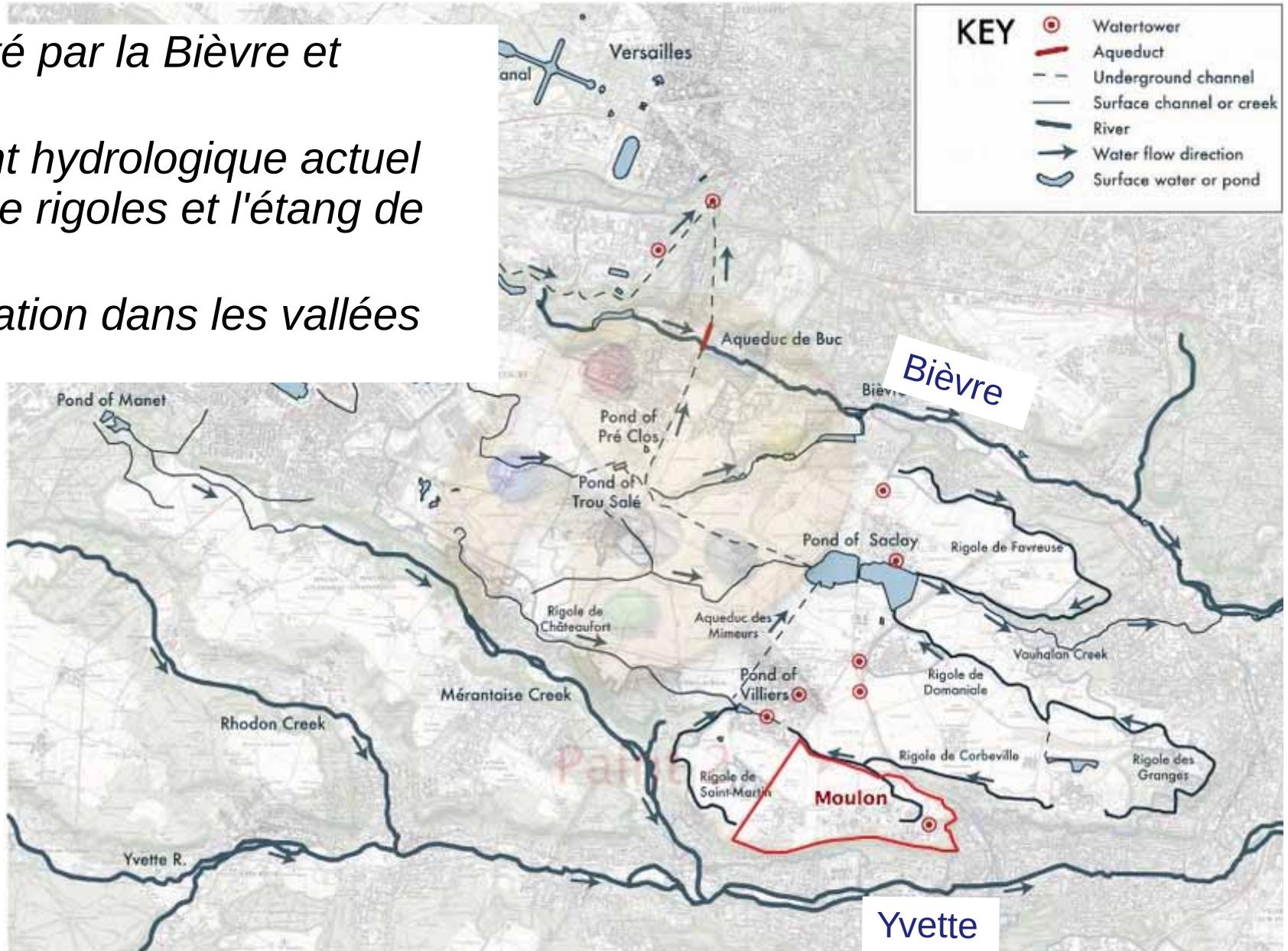


<sup>1</sup> Communauté d'Agglomération du Plateau de Saclay

# I. Contexte

## I.1 Paris-Saclay - enjeux de la gestion des eaux pluviales

- plateau délimité par la Bièvre et l'Yvette
- fonctionnement hydrologique actuel par un réseau de rigoles et l'étang de Saclay
- risque d'inondation dans les vallées

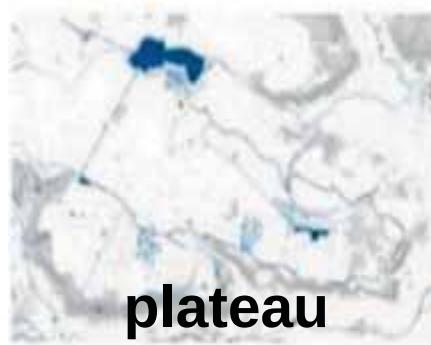


## I.1 Paris-Saclay - Principe de la gestion EP à différentes échelles défini dans l'EGGE<sup>1</sup>

parcelle



quartier



plateau



événements courants



**techniques alternatives  
rétention douce**



événements exceptionnels



**rétention et régulation sur espaces  
publics par un réseau de noues**



événements très exceptionnels



**plaine inondable**

<sup>1</sup> Étude Globale de Gestion des Eaux

## I.1 Paris-Saclay - Thèse CIFRE

**Contexte hydrogéologique**

- sol peu perméable
- présence d'une "nappe" superficielle peu connue

**Questions dans l'aménagement de l'EPPS**

- obligations réglementaires respectées (débit de rejet, utilisation de techniques alternatives) → études opérationnelles
- impacts sur la nappe superficielle ? Efficacité de la gestion alternative ? → besoin d'études scientifiques

**Engagement de l'EPPS dans un partenariat scientifique**

## I.2 Modélisation en hydrologie urbaine

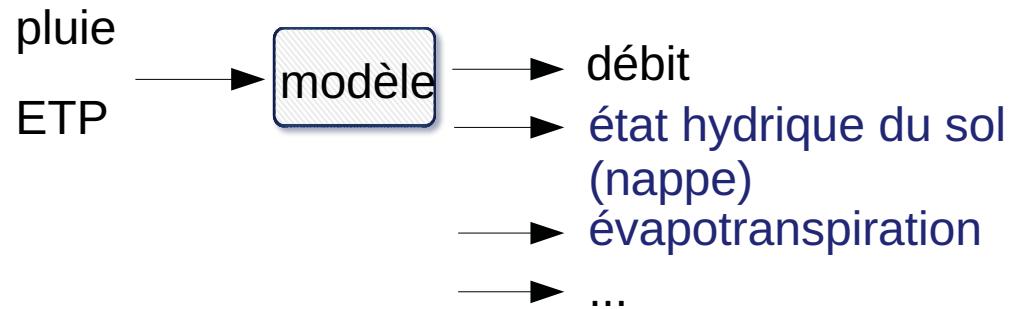
### Évolution d'enjeux

risque d'inondation, ressource en eau →  
qualité de l'environnement urbain ;  
usages d'eau non-potable ;  
adaptation au changement climatique,  
etc.

### Évolution de pratiques

“tout au tuyau” →  
gestion alternative des eaux pluviales

### Évolution de besoin aux modèles



## I.2 Modélisation en hydrologie urbaine

## Évolution des approches

ruissellement sur surfaces imperméabilisées, hydraulique des systèmes tuyaux



### à base physique

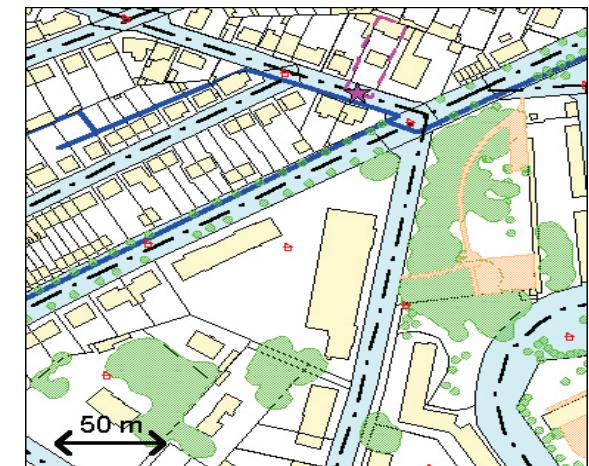
- améliorer la description et compréhension des processus

### distribuées

- variation spatiale → aider à la gestion à des échelles réduites (parcelle)
- couplé avec SIG

### en continu

- variation de l'état hydrique du sol à l'échelle annuelle



### et intégrées

- modéliser le cycle “complet” de l'eau
- prendre en compte les compartiments du sous-sol (zone non-saturée et saturée)

## I.3 Objectifs de la thèse

Cette thèse suit un double objectif :

- contribuer au **développement d'un modèle** à base physique, distribué et intégré, par l'introduction d'un module saturé, pour mieux représenter le niveau saturé du sol
- **appliquer** le modèle sur le quartier du Moulon et évaluer son utilisation dans un projet d'aménagement

démarche

intégration  
du module

évaluation et calage  
sur un bassin versant instrumenté

application du modèle  
sur le quartier du Moulon



## I. Contexte

II. Phase 1: Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation sur le bassin versant du Pin Sec

II.1 Intégration du WTI dans URBS

II.2 Évaluation sur le bassin versant du Pin Sec

II.3 Résumé de Phase 1

III. Phase 2: Application sur le projet d'aménagement du Moulon

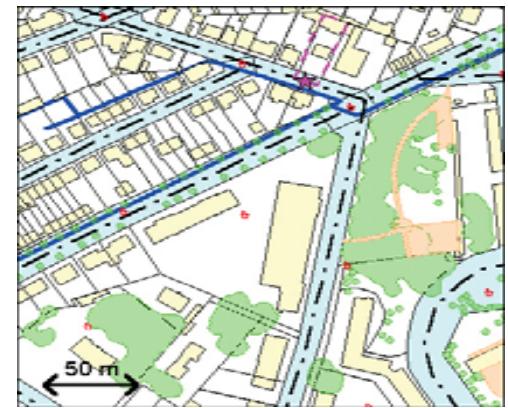
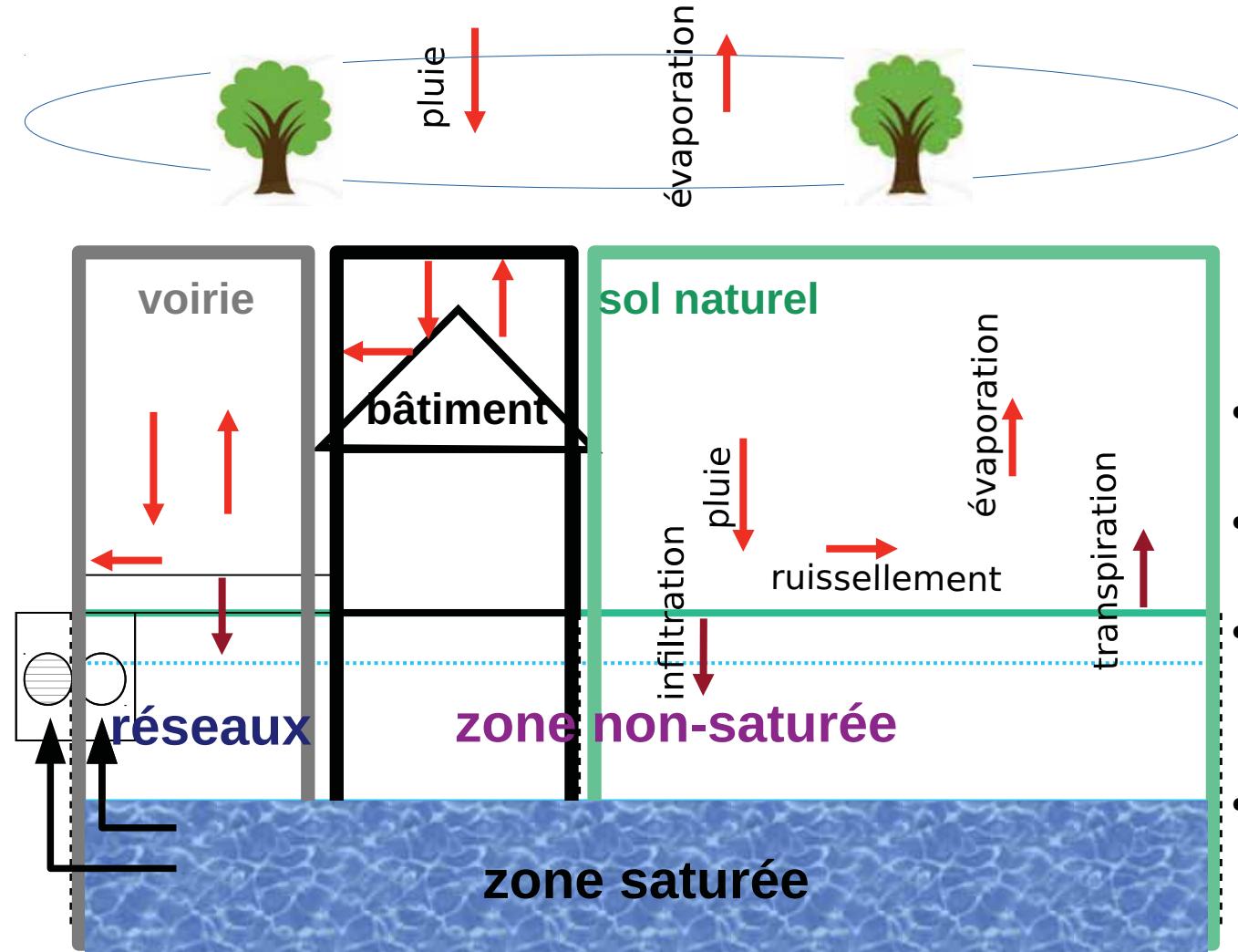
IV. Conclusion, discussion et perspectives

## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.1 Intégration du WTI – présentation du modèle URBS

URBS : *Urban Runoff Branching Structure*, par l'IFSTTAR

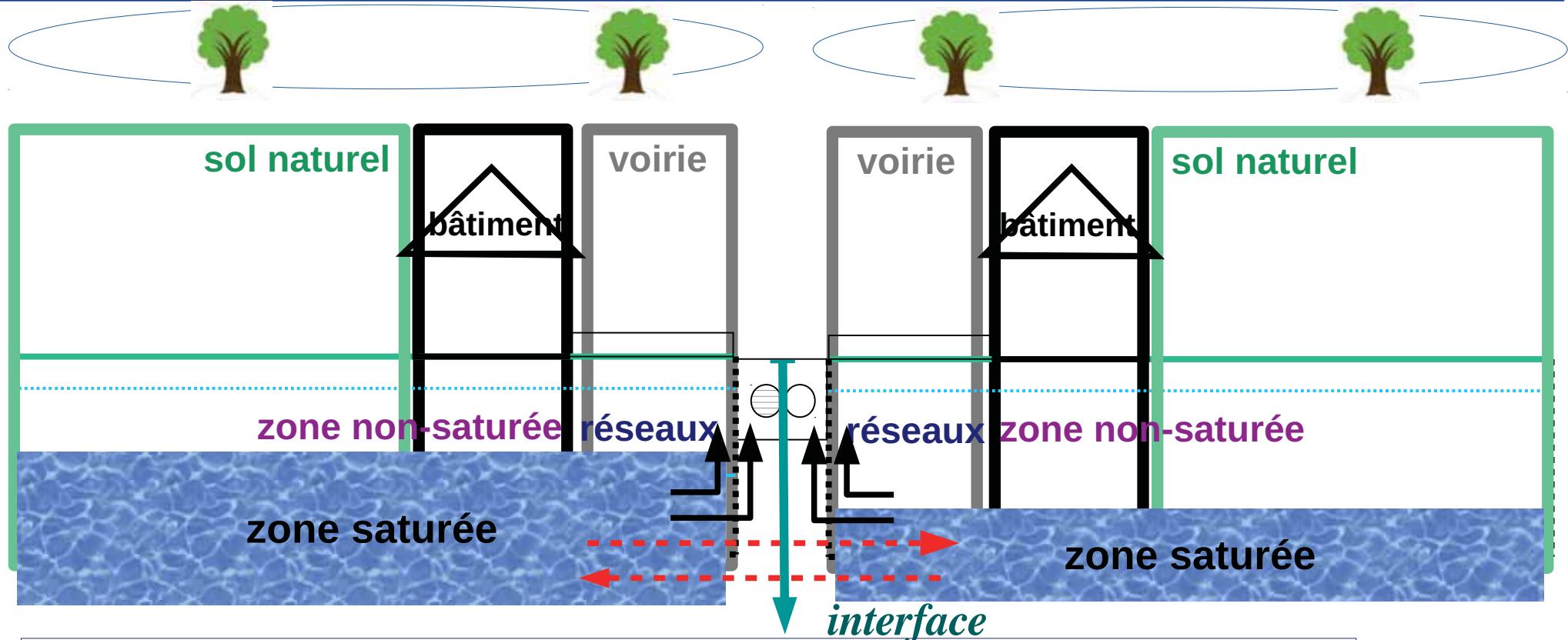
(Morena, 2004 ; Rodriguez et al., 2008 ; Le Delliou, 2009)



- discrétisation à l'UHE (parcelle+voie)
- simulation continue à des pas de temps fins (min)
- multiples sorties : débits, évapotranspiration, niveau de la nappe
- $Q_{\text{drain}}$  pris en compte

## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.1 Intégration du WTI - Problématique : écoulements latéraux dans la zone saturée

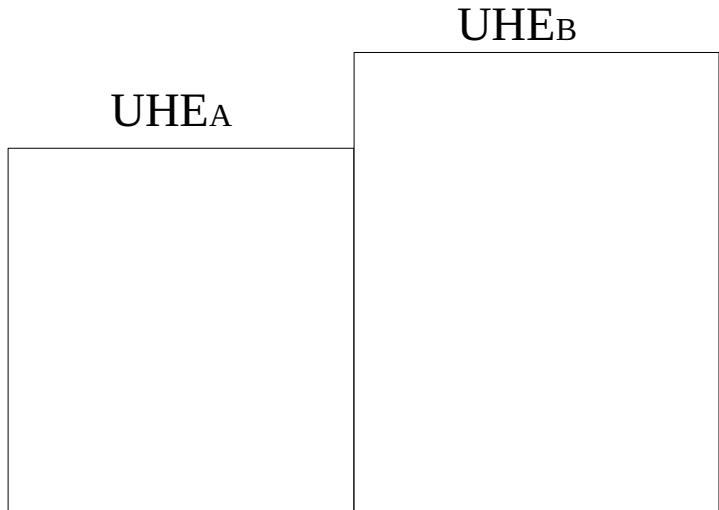


Un couplage MODFLOW/URBS (Le Delliou, 2009) n'a pas été satisfaisant, en raison des paramétrisations du sol, différentes dans les deux modèles.

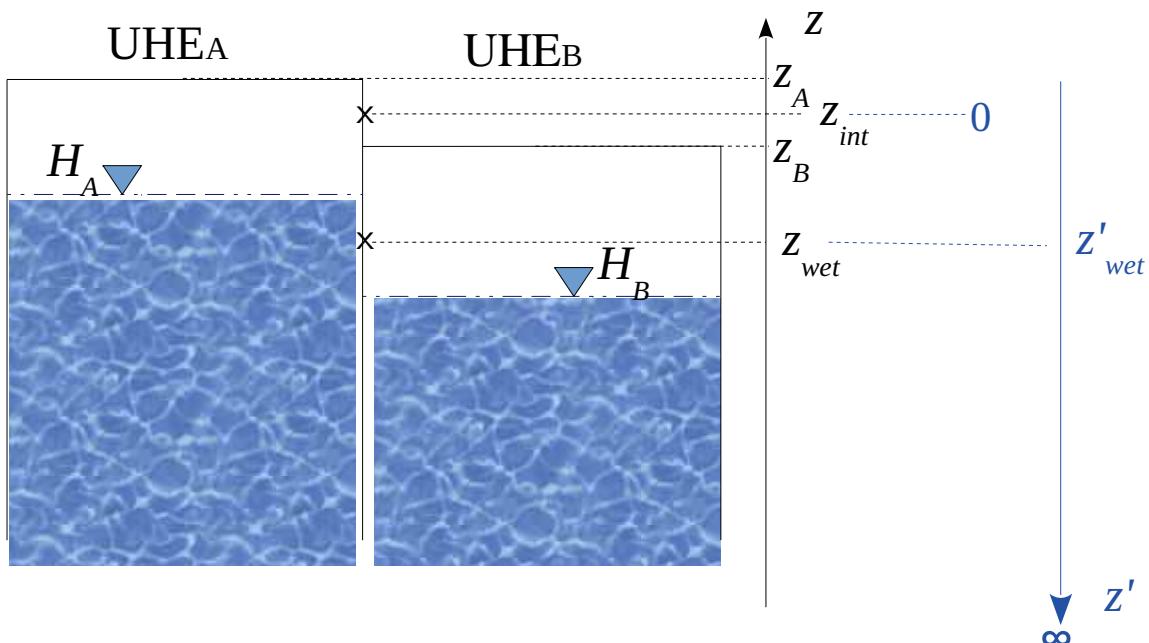
Cette thèse : intégrer le module WTI (Branger, 2007 ; Jankowfsky, 2011) dans URBS pour calculer un flux de Darcy entre deux UHEs

## II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

(a) vue de dessus

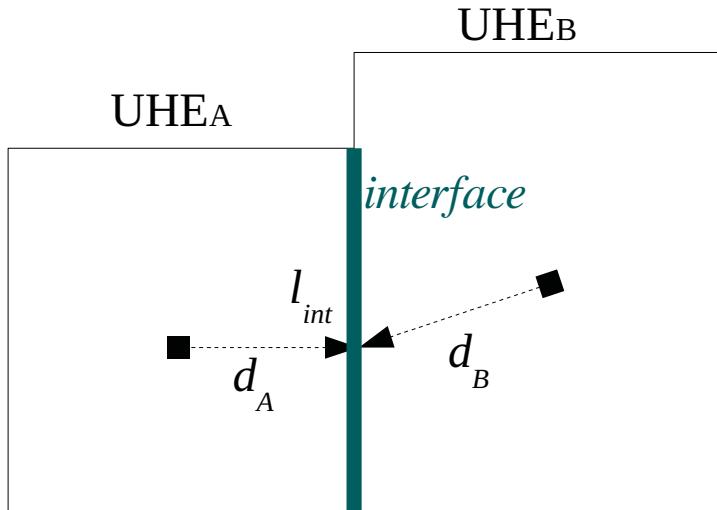


(b) coupe verticale

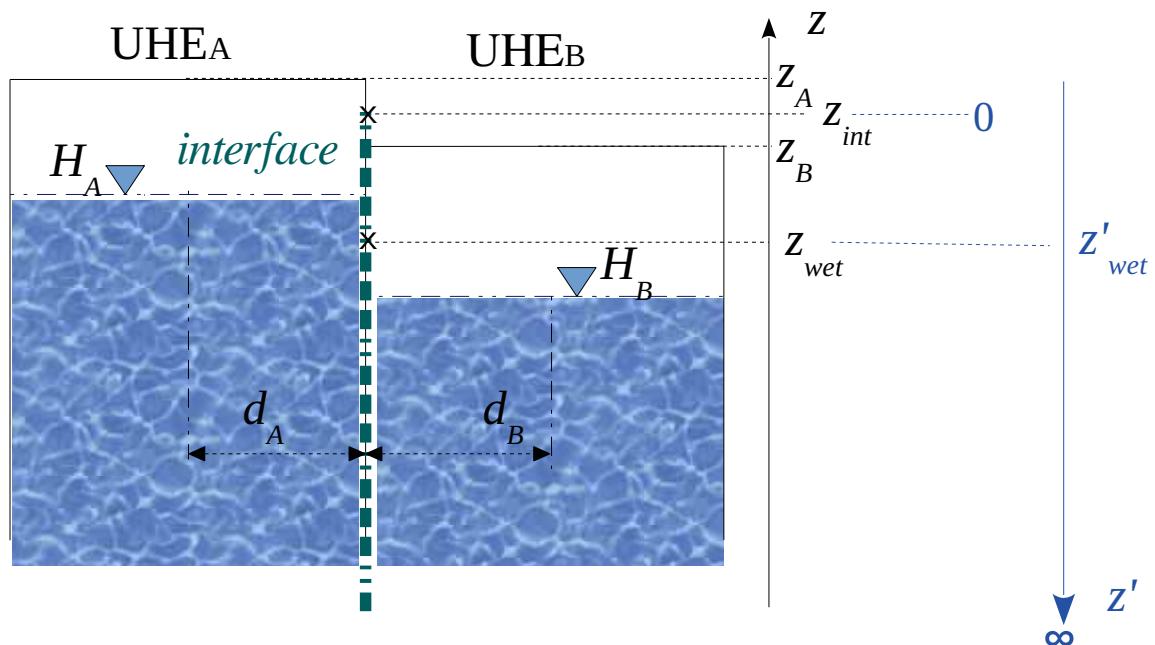


### II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

(a) vue de dessus

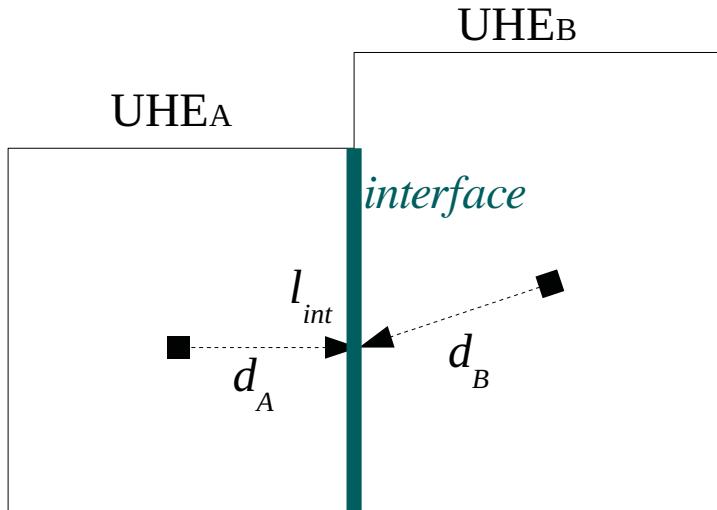


(b) coupe verticale

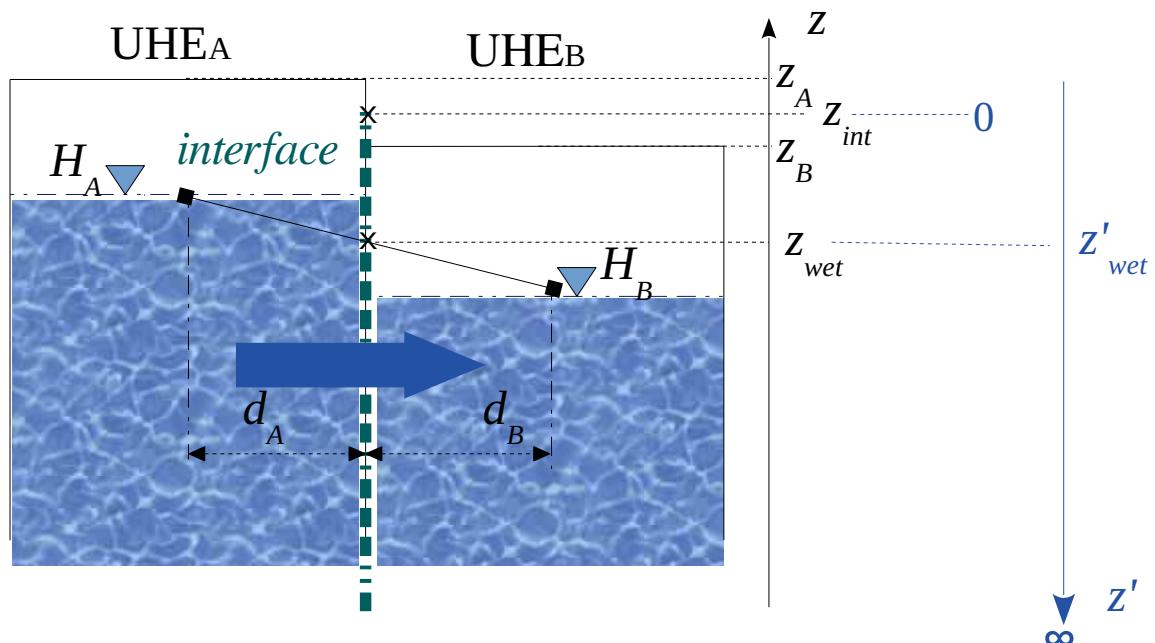


### II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

(a) vue de dessus



(b) coupe verticale

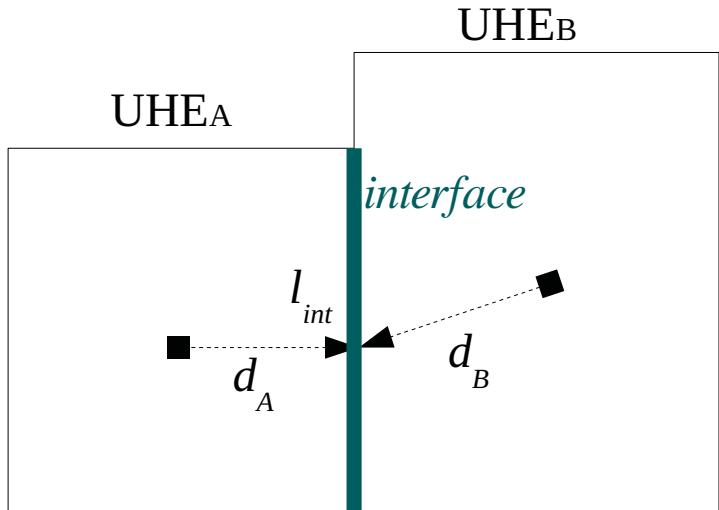


flux WTI (Darcy)

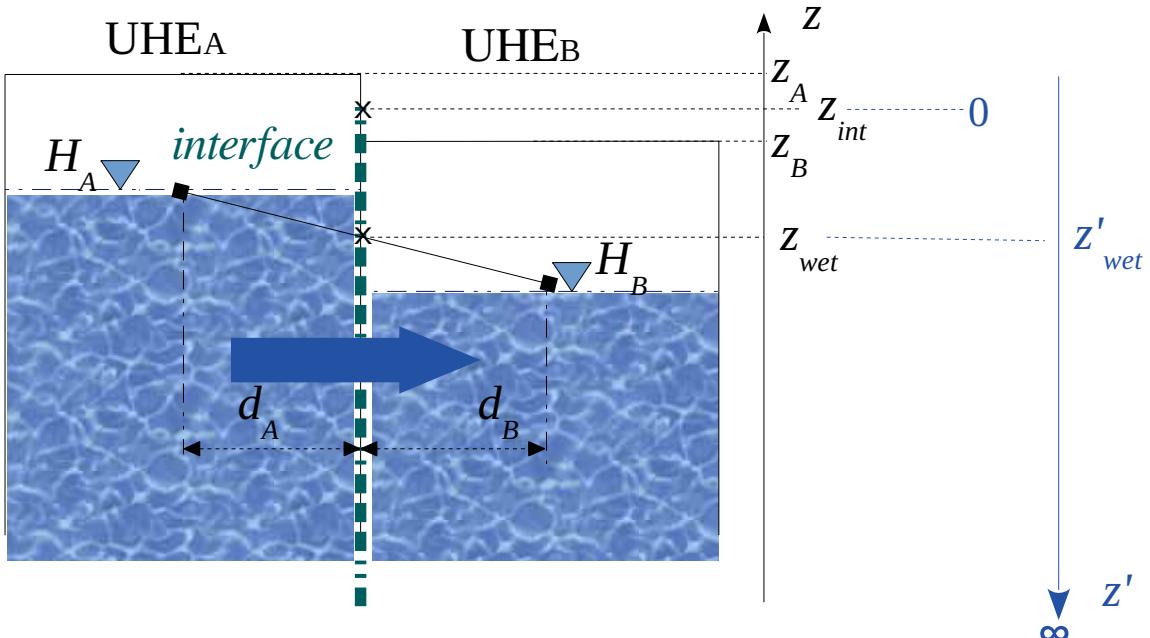
$$Q_{A \rightarrow B} = K_{interface} A_{interface} \nabla H$$

### II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

(a) vue de dessus



(b) coupe verticale



flux WTI (Darcy)

$$Q_{A \rightarrow B} = K_{interface} A_{interface} \nabla H$$

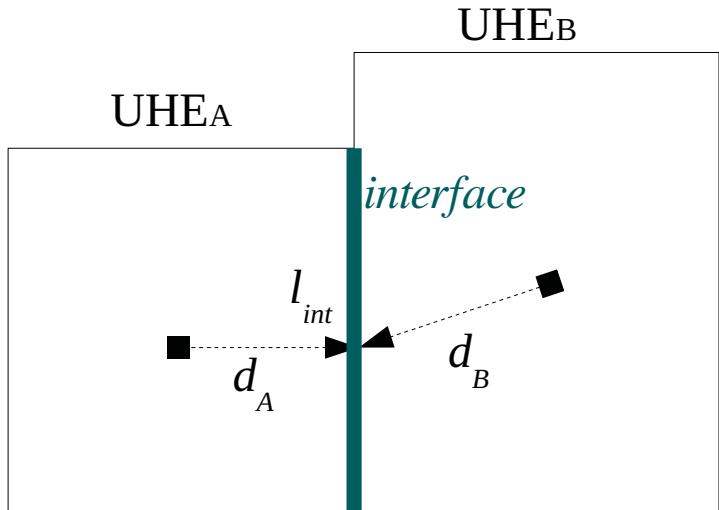
dans URBS :

- pas de substrat au fond
- $K$  décroît en profondeur

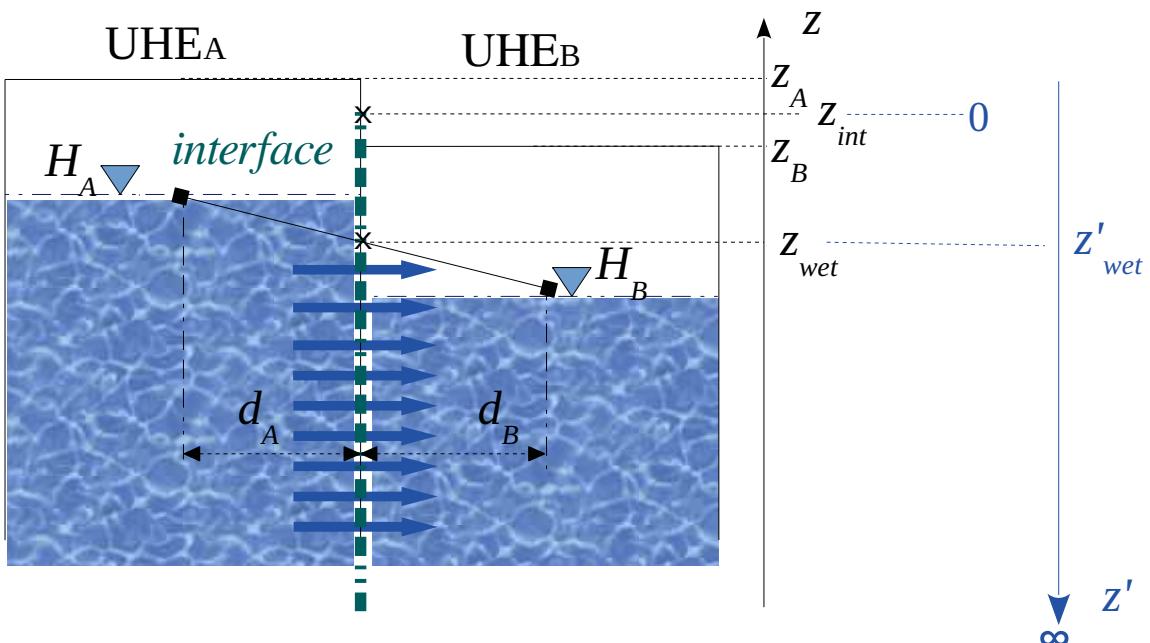
$$K_{sat}(z) = K_s \exp(-z/M)$$

### II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

(a) vue de dessus



(b) coupe verticale



flux WTI (Darcy)

$$Q_{A \rightarrow B} = K_{interface} A_{interface} \nabla H$$

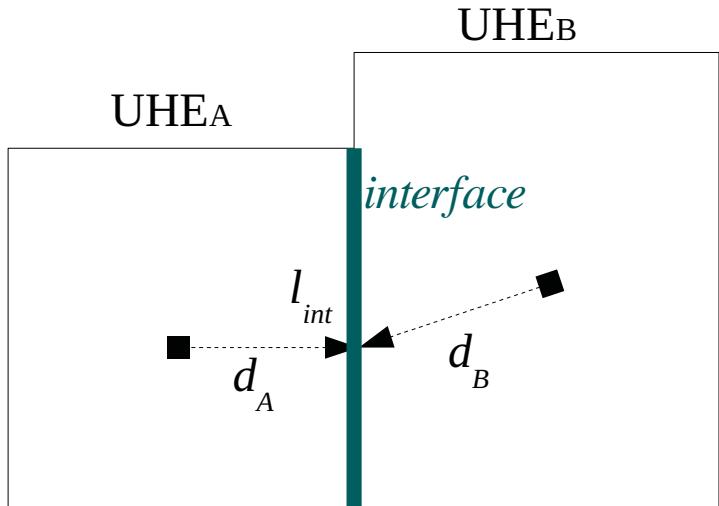
dans URBS :

- pas de substrat au fond
- $K$  décroît en profondeur

$$K_{sat}(z) = K_s \exp(-z/M)$$

### II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

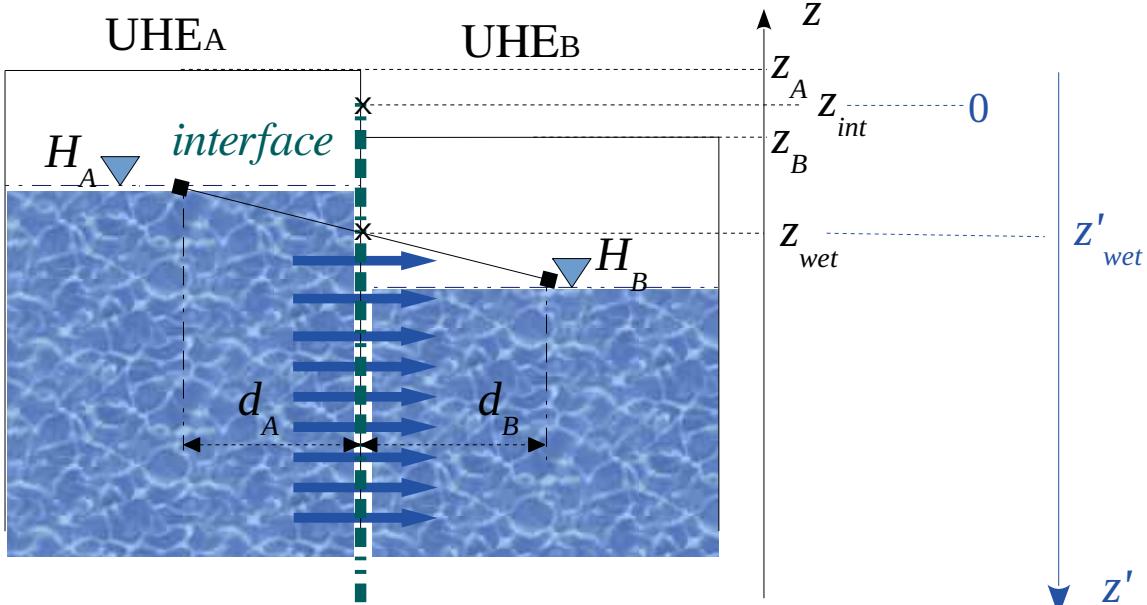
(a) vue de dessus



flux WTI (Darcy)

$$Q_{A \rightarrow B} = K_{interface} A_{interface} \nabla H$$

(b) coupe verticale



formule intégrale

$$Q_{A \rightarrow B} = \int_{z_wet}^{\infty} K_s^{nat} \exp(-z'/M) \cdot dA_{interface} \cdot \nabla H$$

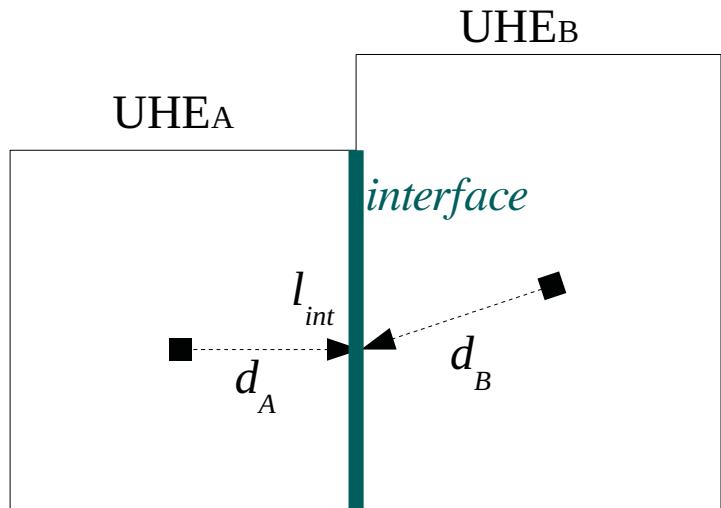
dans URBS :

- pas de substrat au fond
- $K$  décroît en profondeur

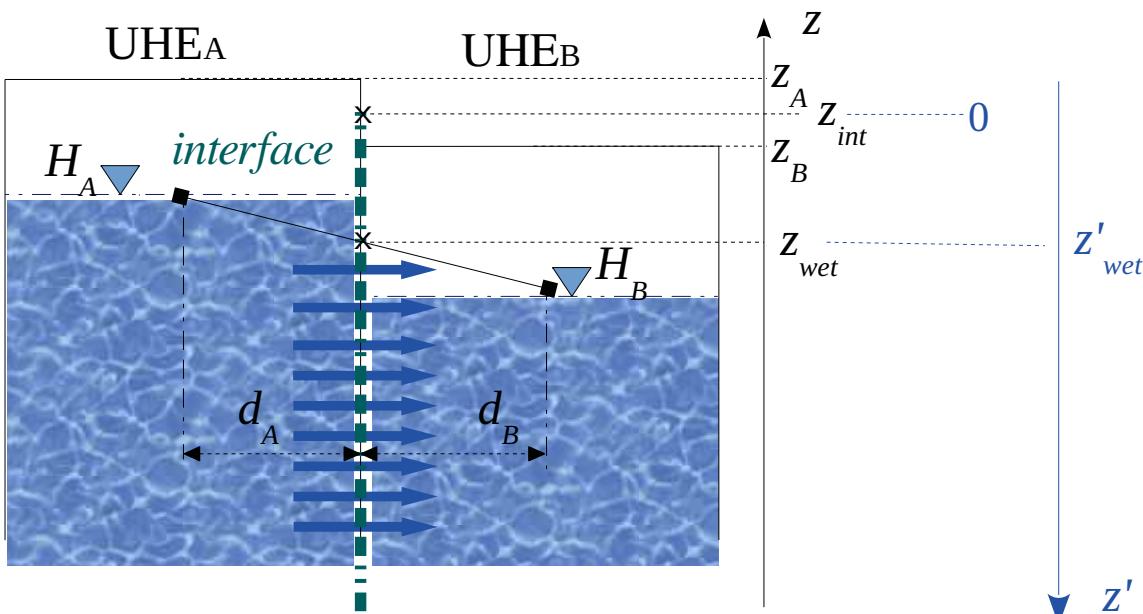
$$K_{sat}(z) = K_s \exp(-z/M)$$

### II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

(a) vue de dessus



(b) coupe verticale



flux WTI (Darcy)

$$Q_{A \rightarrow B} = K_{interface} A_{interface} \nabla H$$



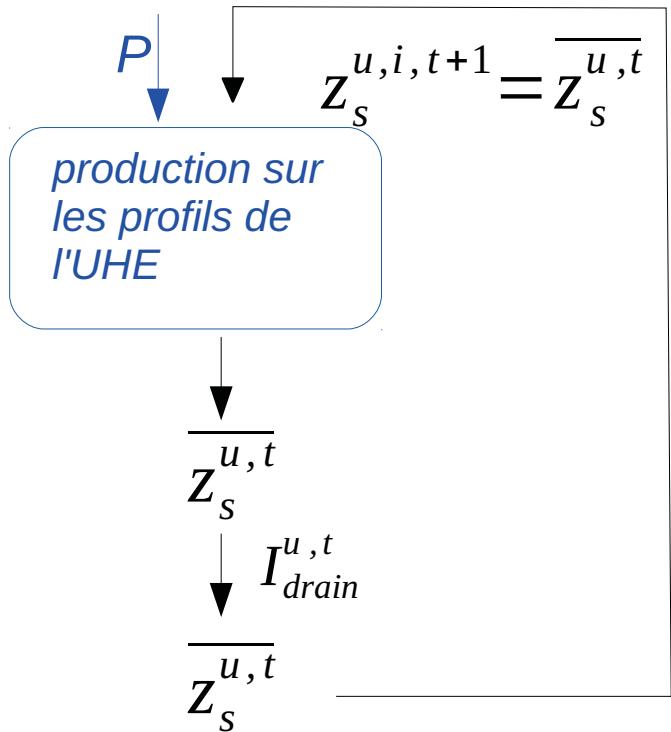
formule intégrale

$$Q_{A \rightarrow B} = \int_{z_{wet}}^{\infty} K_s^{nat} \exp(-z'/M) \cdot dA_{interface} \cdot \nabla H$$

formulation finale pour le flux WTI intégral

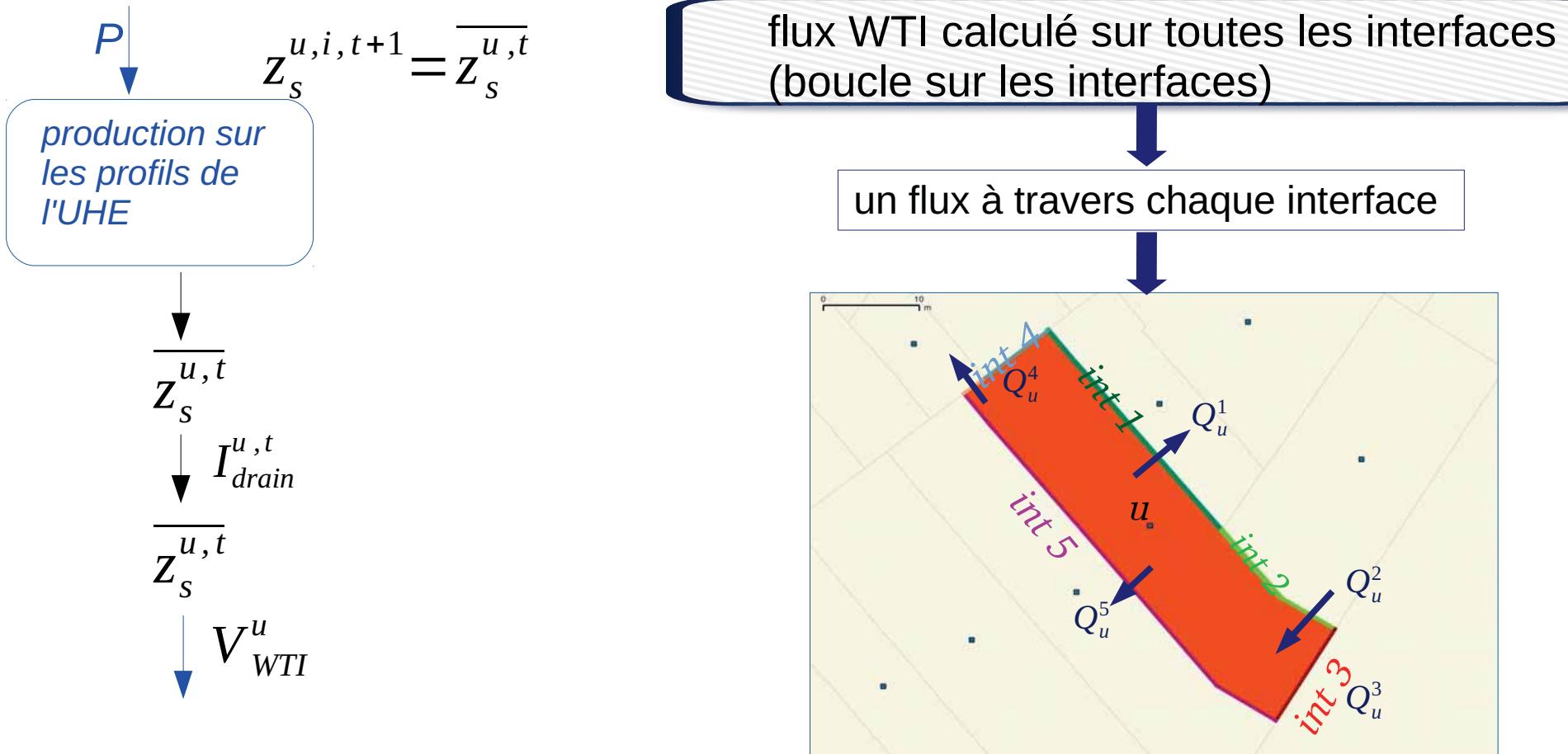
$$Q_{A \rightarrow B} = K_s^{nat} \cdot \exp(-z'_{wet}/M) \cdot l_{int} \cdot M \cdot \frac{H_A - H_B}{d_A + d_B}$$

## II.1 Intégration de WTI – discrétilsation spatiale &amp; temporelle



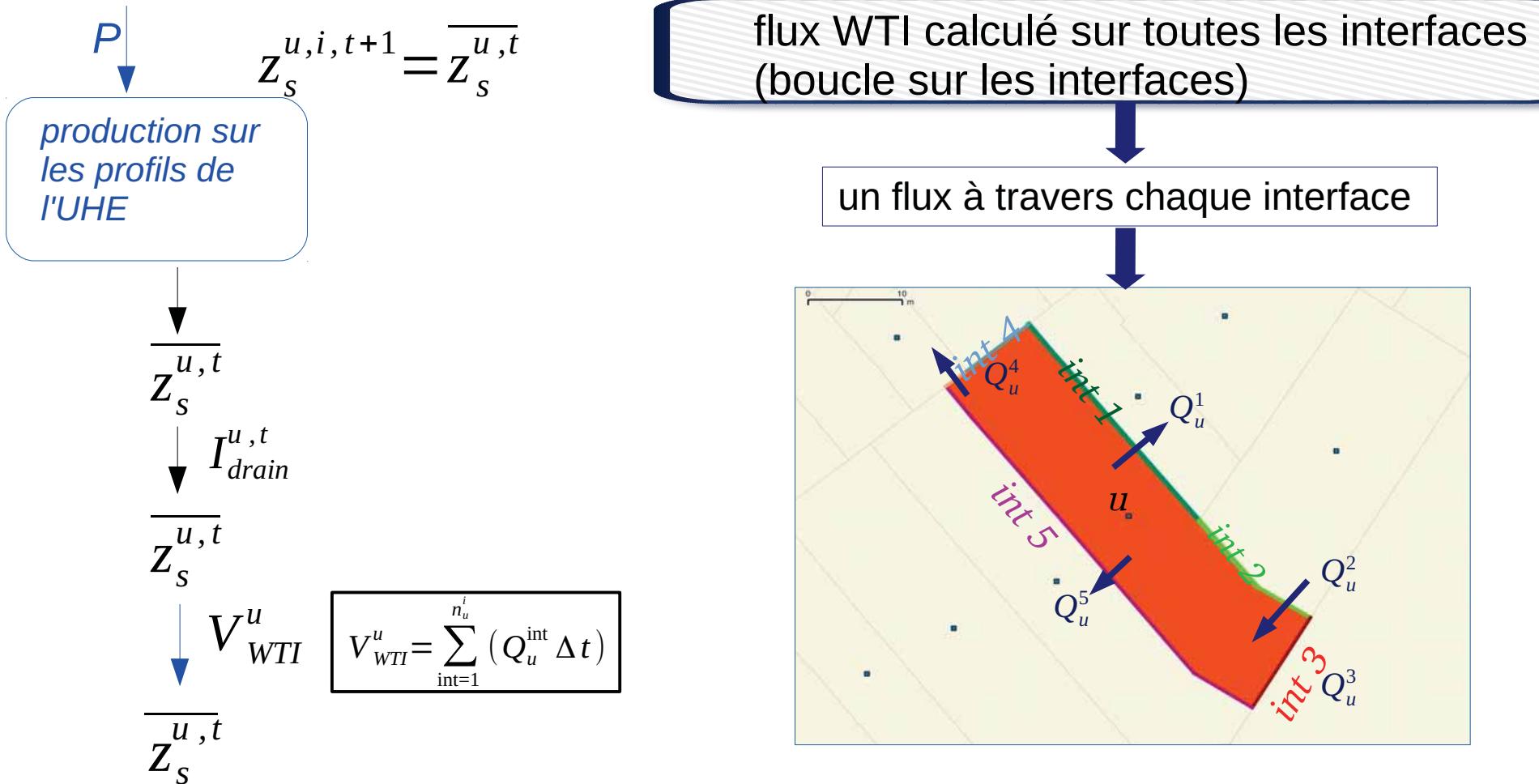
## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.1 Intégration de WTI – discréétisation spatiale & temporelle



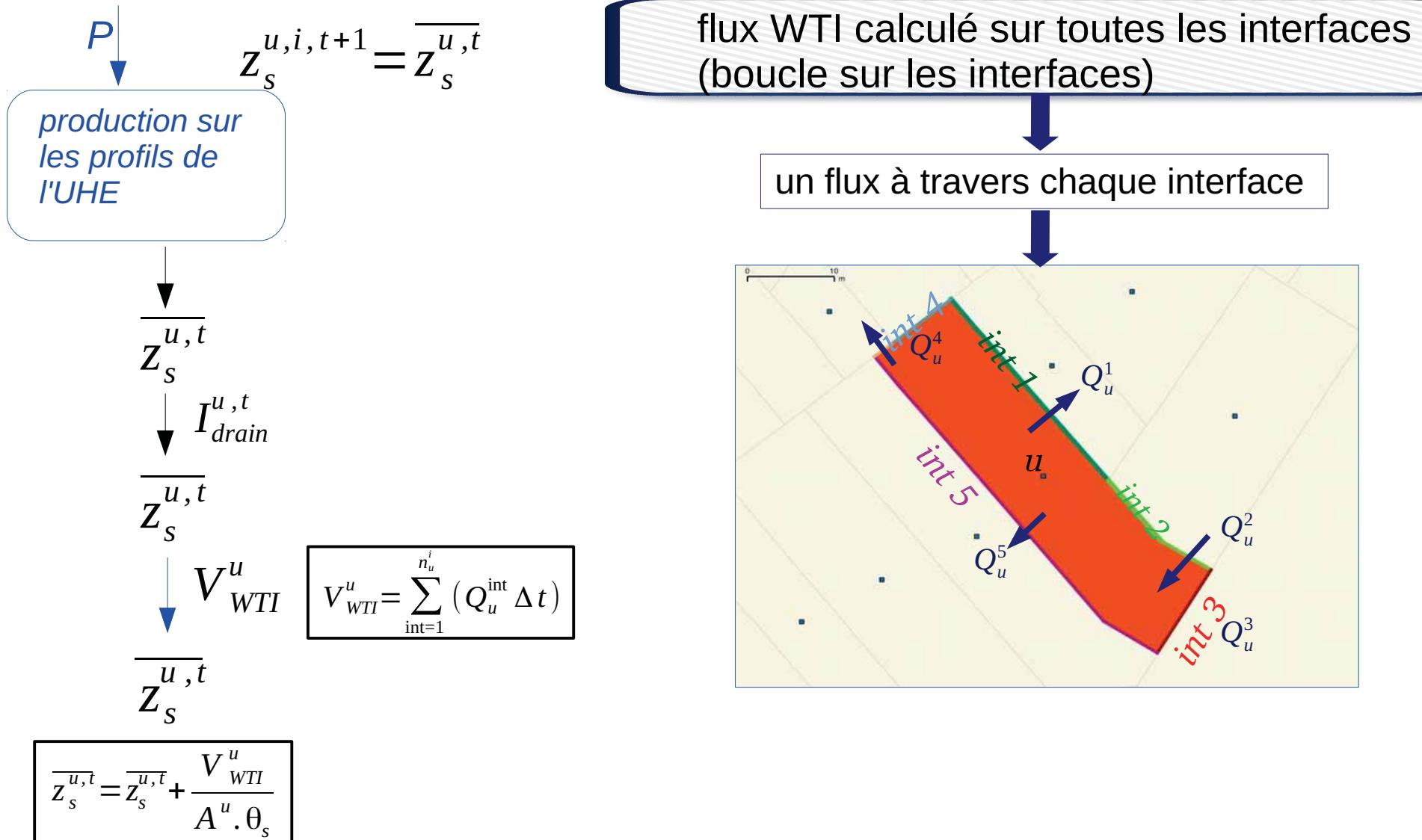
## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.1 Intégration de WTI – discréétisation spatiale & temporelle



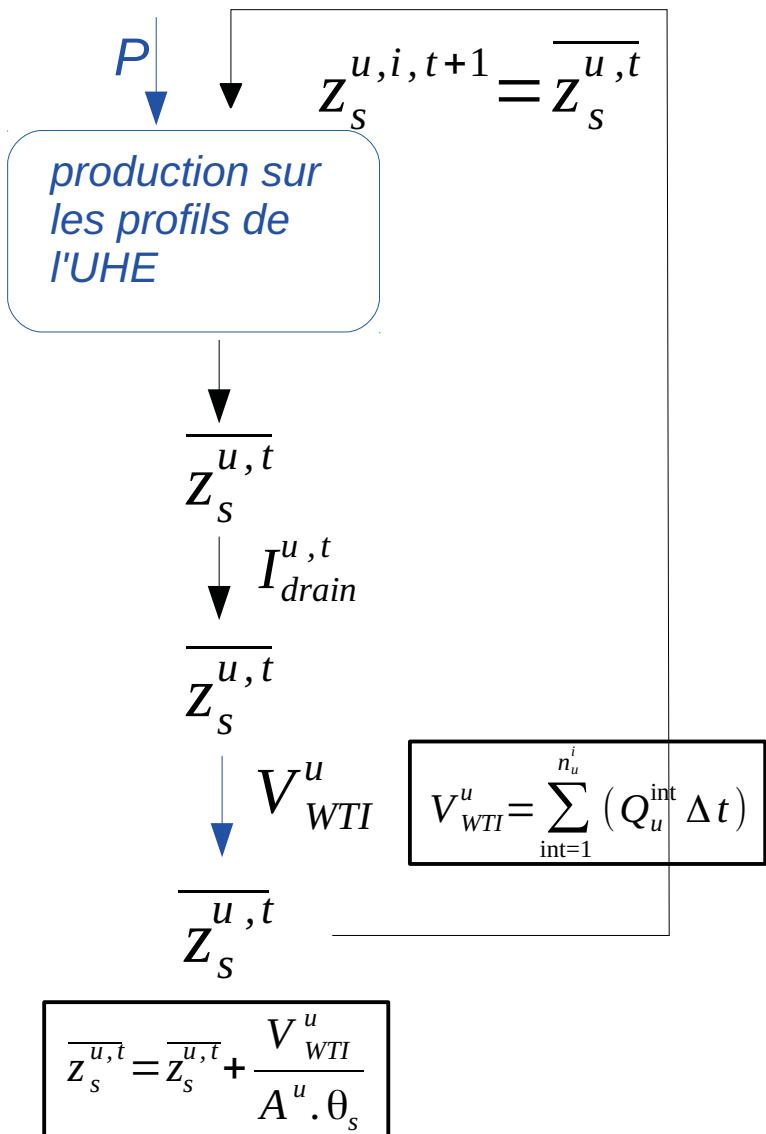
## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.1 Intégration de WTI – discréétisation spatiale & temporelle



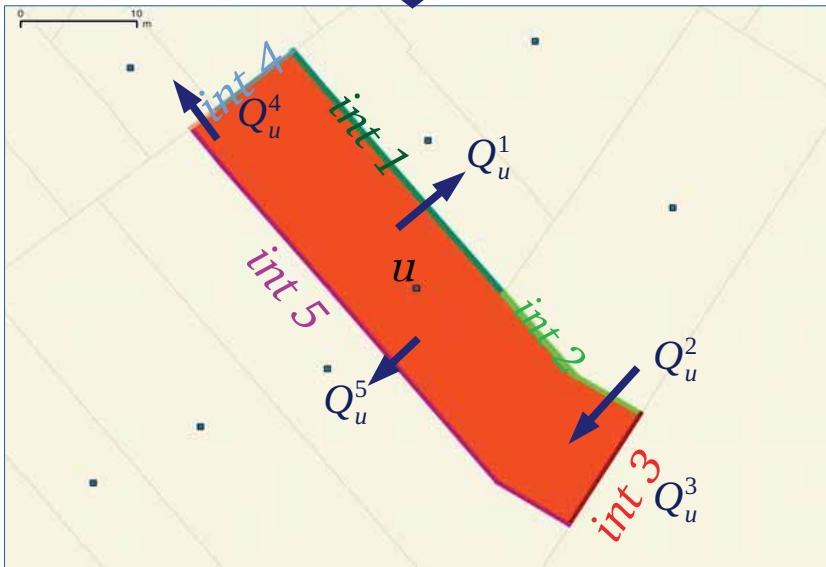
## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.1 Intégration de WTI – discréétisation spatiale & temporelle



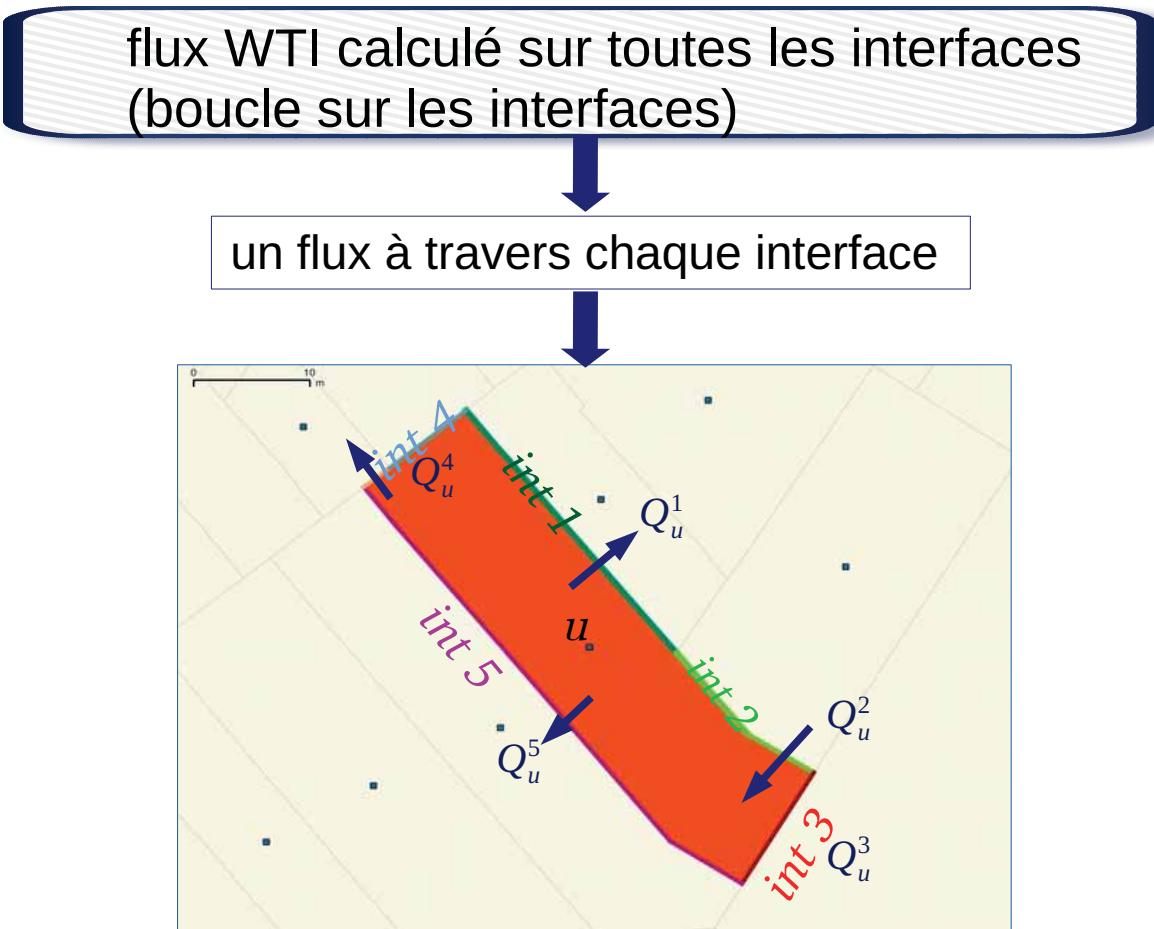
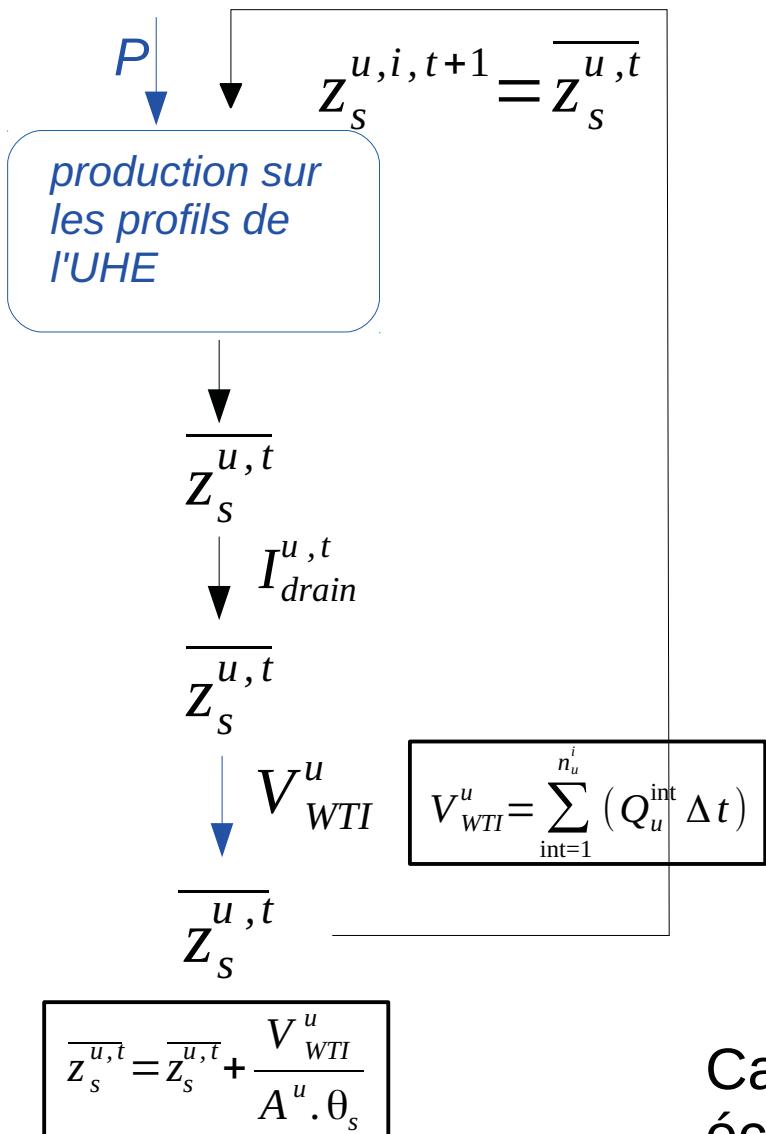
flux WTI calculé sur toutes les interfaces  
(boucle sur les interfaces)

un flux à travers chaque interface



## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

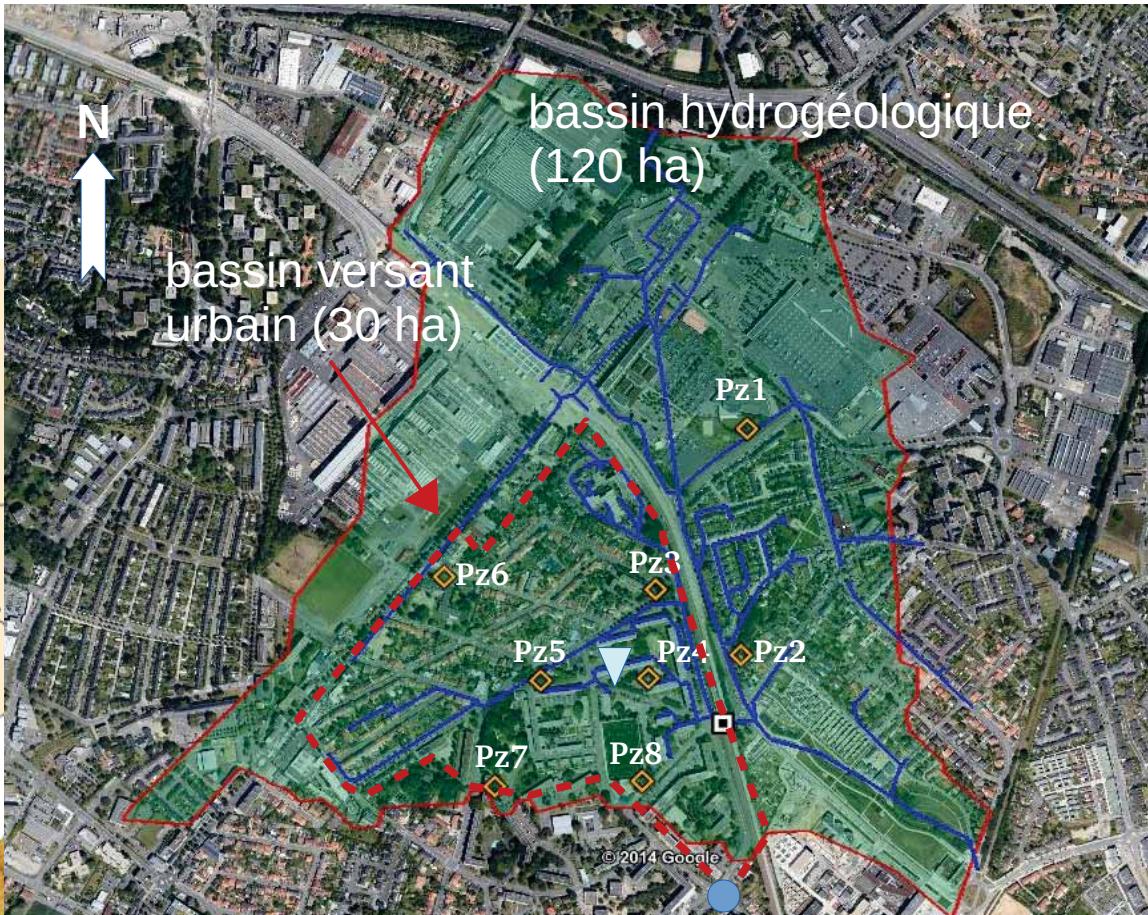
### II.1 Intégration de WTI – discréétisation spatiale & temporelle



Calculs numériques vérifiés manuellement sur un échantillon d'UHEs → évaluation URBS-WTI sur Pin Sec

## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.2 Évaluation sur Pin Sec – présentation du site

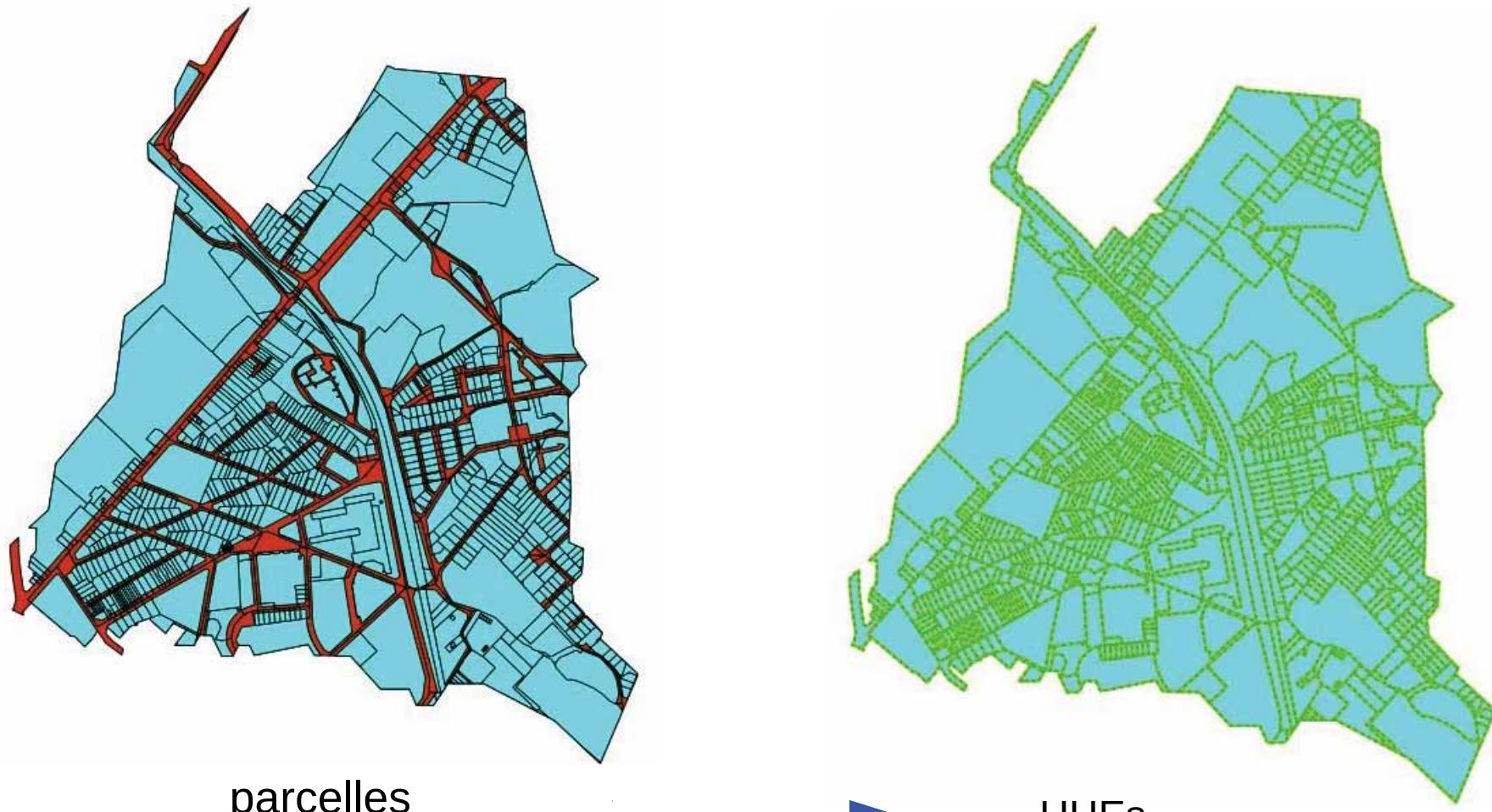


- bassin versant expérimental de l'ONEVU<sup>1</sup> (IRSTV)
- instrumentation : pluie, débit, piézomètres
- bassin versant urbain compris dans un bassin hydrogéologique

<sup>1</sup> Observatoire Nantais des Environnements Urbains

## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.2 Évaluation sur Pin Sec – pré-traitement géographique



parcelles  
voiries

méthode inspirée de  
(Jankowfsky, 2011 ; Paille, 2010)

UHEs  
Interfaces

## II.2 Évaluation sur Pin Sec – démarche

démarche

simulation initiale avec  
paramètres initiaux



étude de sensibilité et  
calage des paramètres



simulation avec  
paramètres calés



validation sur une  
période différente  
**(complément)**

évaluation**multiples variables**

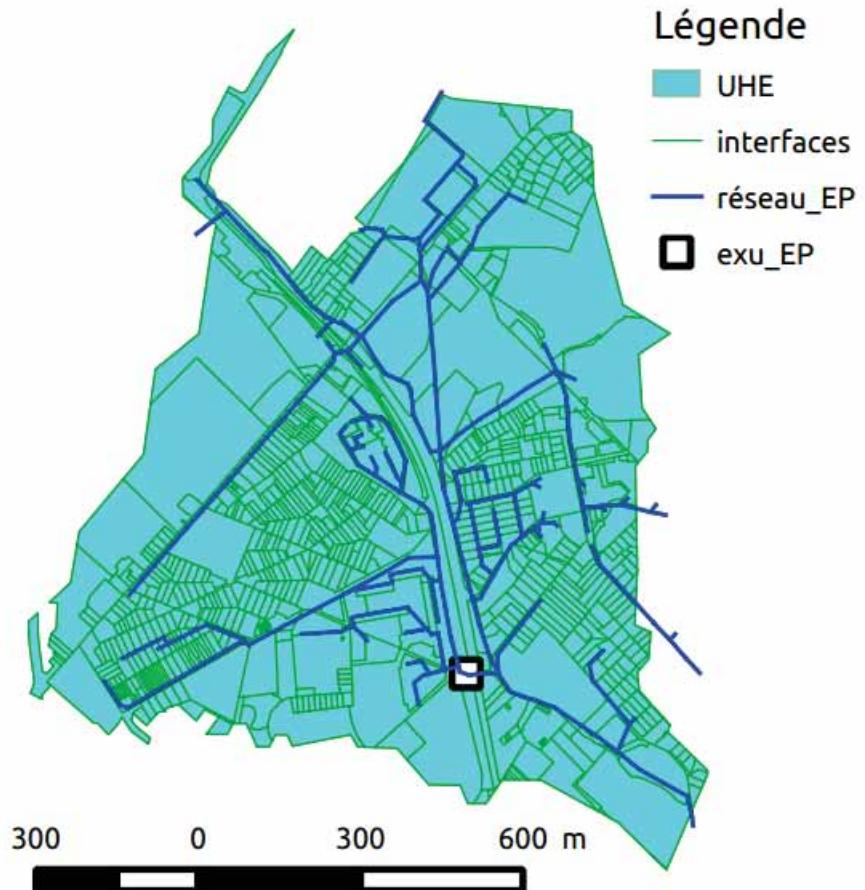
- niveaux piézométriques
- bilan hydrologique
- débit

**critères**

- Cnash : critère hydrologique  
[-∞, 1]
- Cb : bias [-∞, +∞]
- R<sup>2</sup> : dispersion [0, 1]

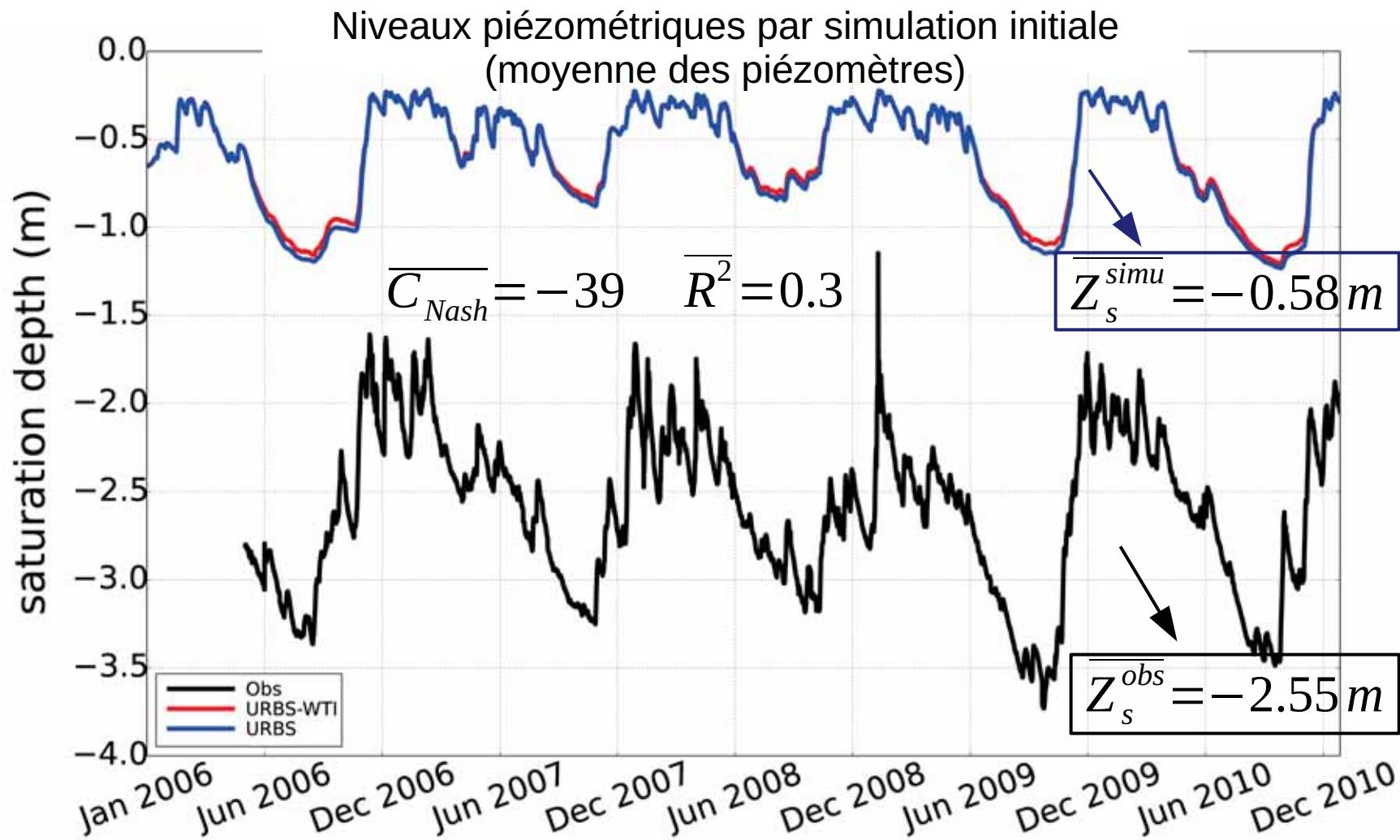
## II.2 Évaluation sur Pin Sec – simulation initiale

- données d'entrée: pluie, ETP
- bassin d'application : bassin versant hydrogéologique
- condition aux limites de subsurface: flux nuls
- condition initiale : profondeur homogène de la nappe
- paramètres initiaux : pris de (Morena, 2004 ; Rodriguez *et al.*, 2008 ; Le Delliou, 2009) ou estimés de la littérature



# III. Phase 2 : Application sur Moulon

## II.2 Évaluation sur Pin Sec – simulation initiale



- niveaux piézométriques sur-estimés
- impact du WTI non observé
- autres variables (débit, bilan) → ne sont pas modifiées par WTI

## II.2 Évaluation sur Pin Sec – Étude de sensibilité et calage

**Buts:**

1. Étudier la **sensibilité** des paramètres.
2. Les paramètres peuvent-il être **calés**?
3. WTI peut-t-il **améliorer** la performance du modèle?

**Paramètres choisis:**

paramètres ayant un impact sur WTI  
+ condition initiale de la nappe

**Méthode:**

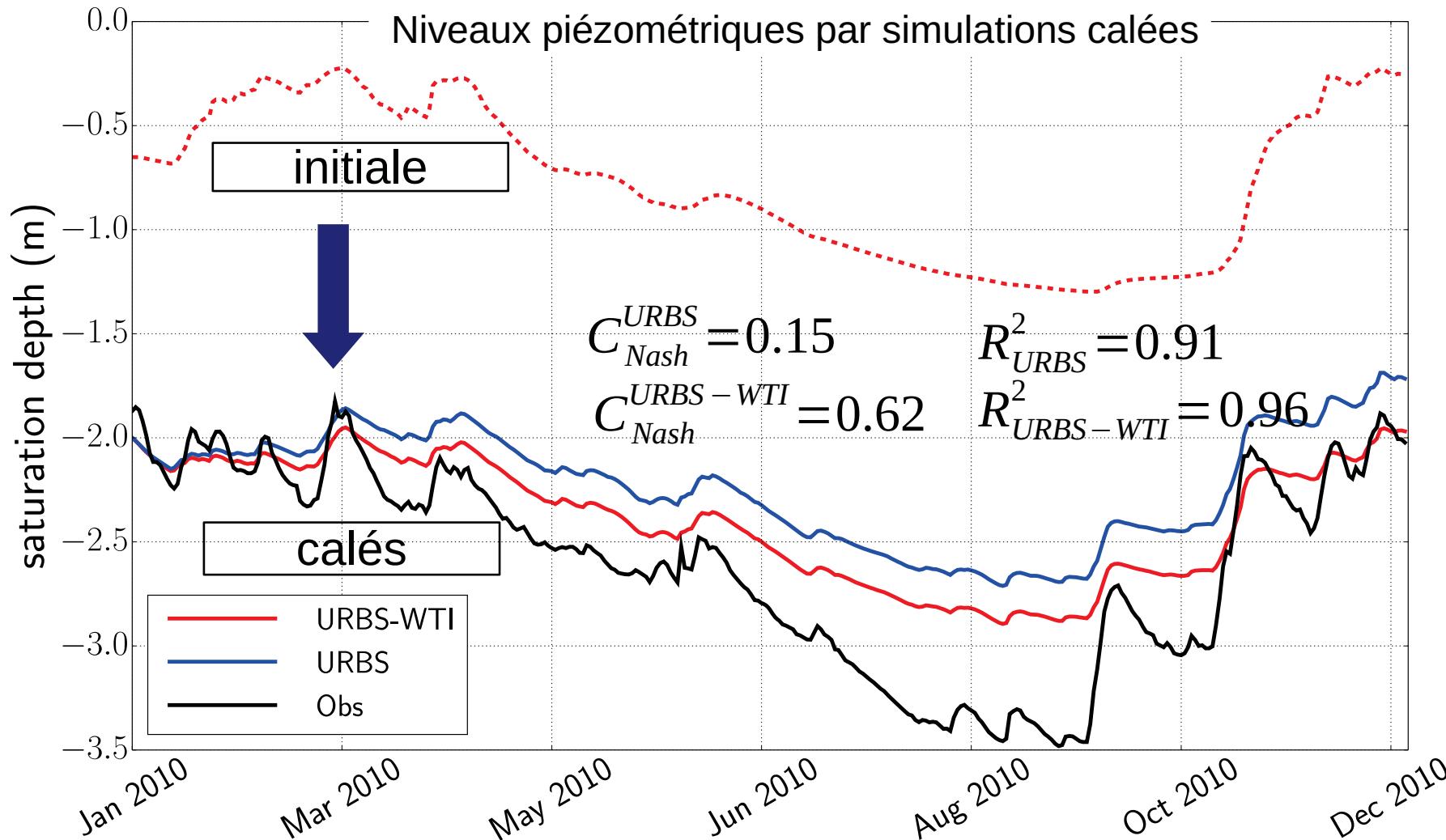
- test “un par un”
- calage basé sur les niveaux piézométriques
- multiples variables
- multiples critères
- URBS vs. URBS-WTI
- simulation sur l'année 2010

	signification	unit	initial Value	variation range
$K_s$	hydraulic conductivity at saturation	m/s	$1 \times 10^{-6}$	$[1 \times 10^{-8}, 1 \times 10^{-5}]$
$M$	scaling parameter of the hydraulic conductivity	-	2	[0.1, 25]
$\lambda$	groundwater drainage coefficient	-	4	[0, 100]
$z_s^0$	initial saturation depth of the catchment	m	1.2	[0.2, 3]

Paramètres et condition initiale testés durant l'étude de sensibilité

## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.2 Évaluation sur Pin Sec – simulations calées

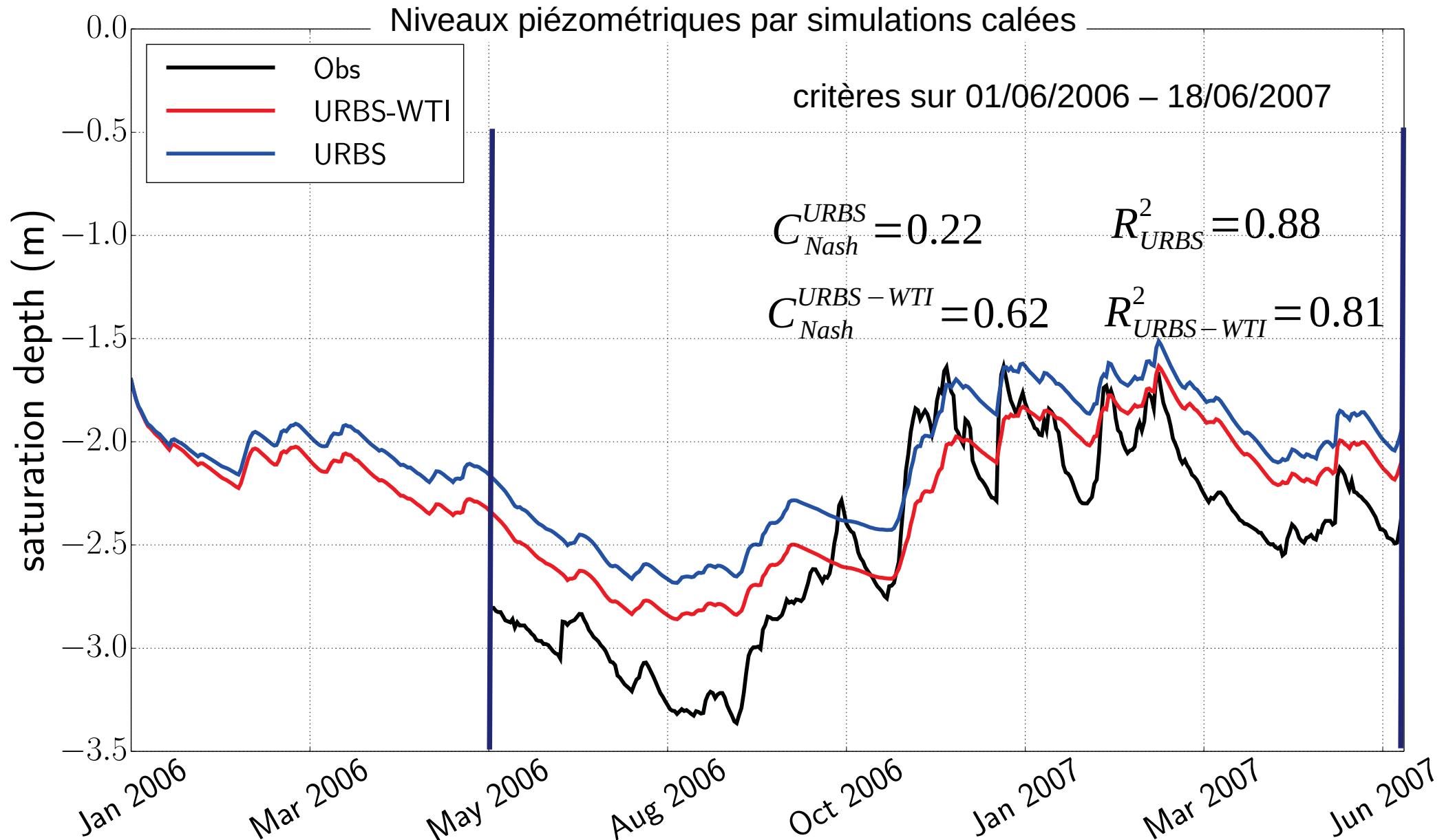


- Les courbes sont plus proches de l'observation.
- Le module WTI permet d'améliorer le niveau simulé.
- La dynamique observée n'est pas assez bien reproduite par les modèles.



## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

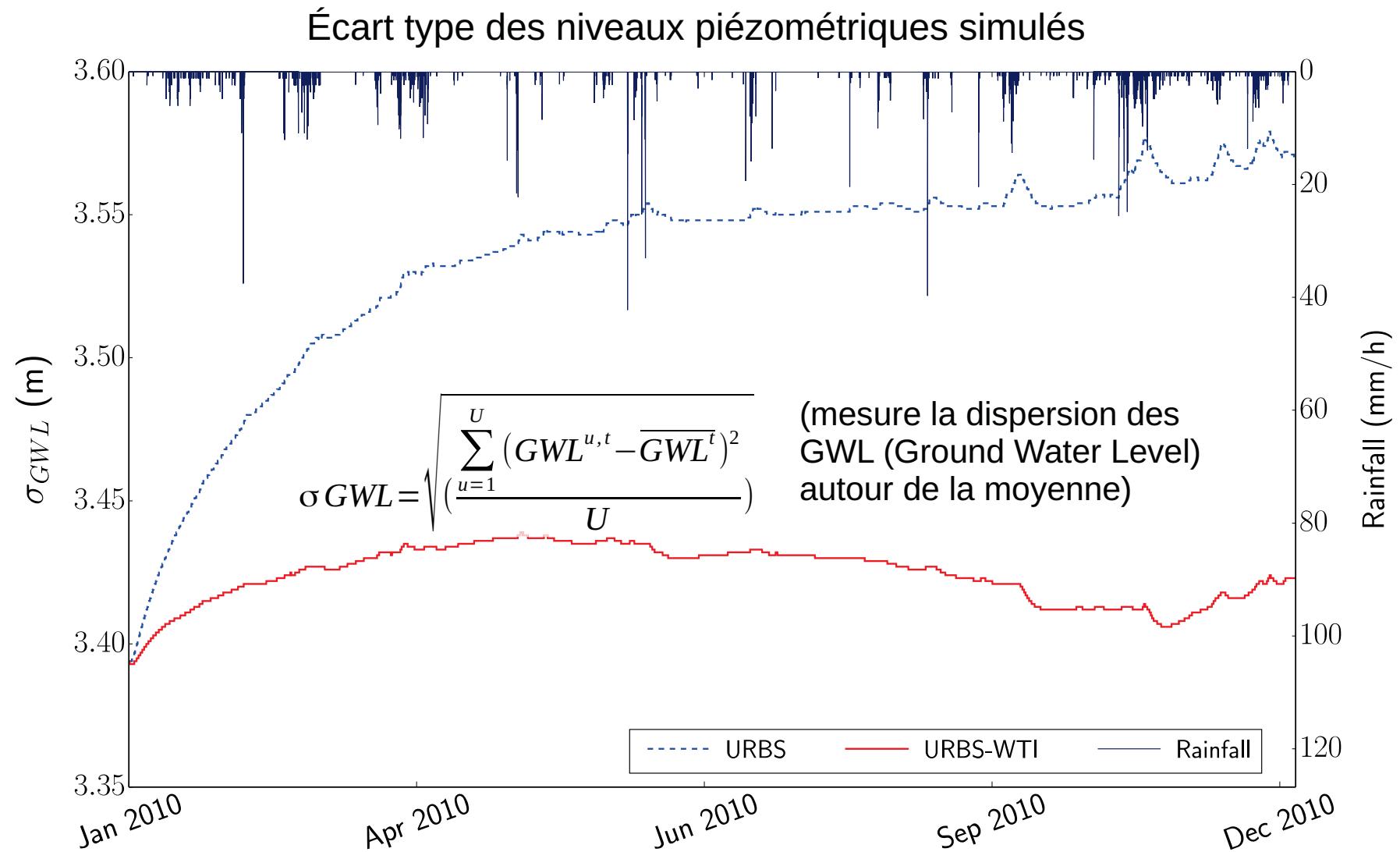
### II.2 Évaluation sur Pin Sec – validation





## II. Phase 1 : Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation

### II.2 Évaluation sur Pin Sec – effet d'homogénéisation du WTI



En partant de la même valeur, URBS continue à croître; URBS-WTI se stabilise

### II.3 Résumé de Phase 1

- Le module saturé WTI a été intégré dans URBS.
- URBS-WTI permet de mieux simuler le niveau de nappe.

I. Contexte

II. Phase 1: Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation sur le bassin versant du Pin Sec

III. Phase 2: Application sur le projet d'aménagement du Moulon

III.1 Contexte hydrogéologique

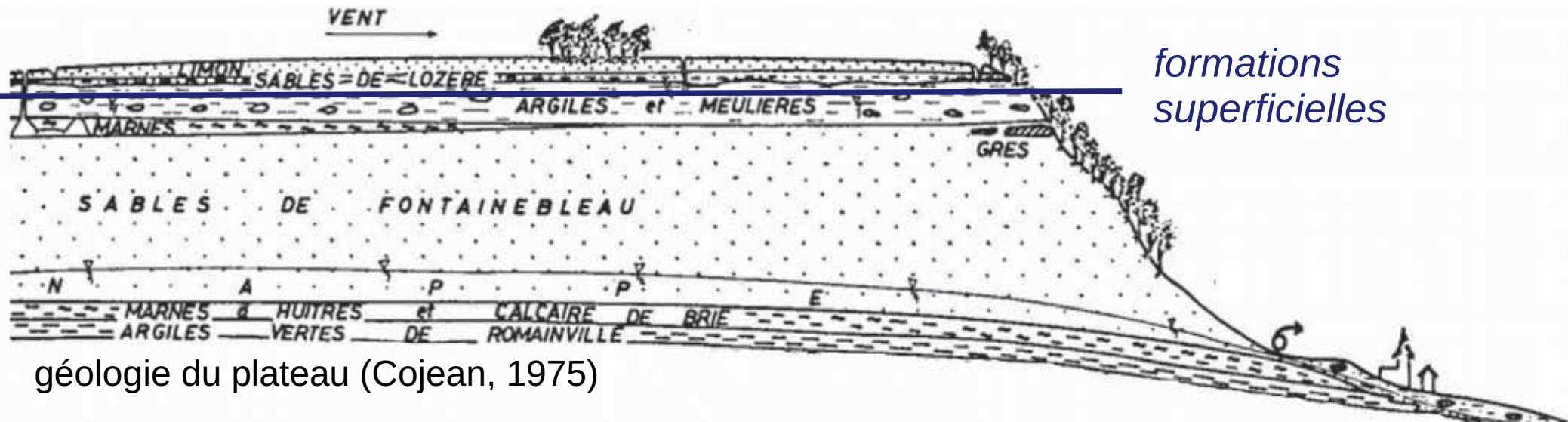
III.2 Modélisation pour l'état actuel

III.3 Modélisation pour l'état futur

III.4 Résumé de Phase II

IV. Conclusion, discussion et perspectives

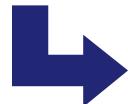
### III.1 Contexte hydrogéologique



formations superficielles

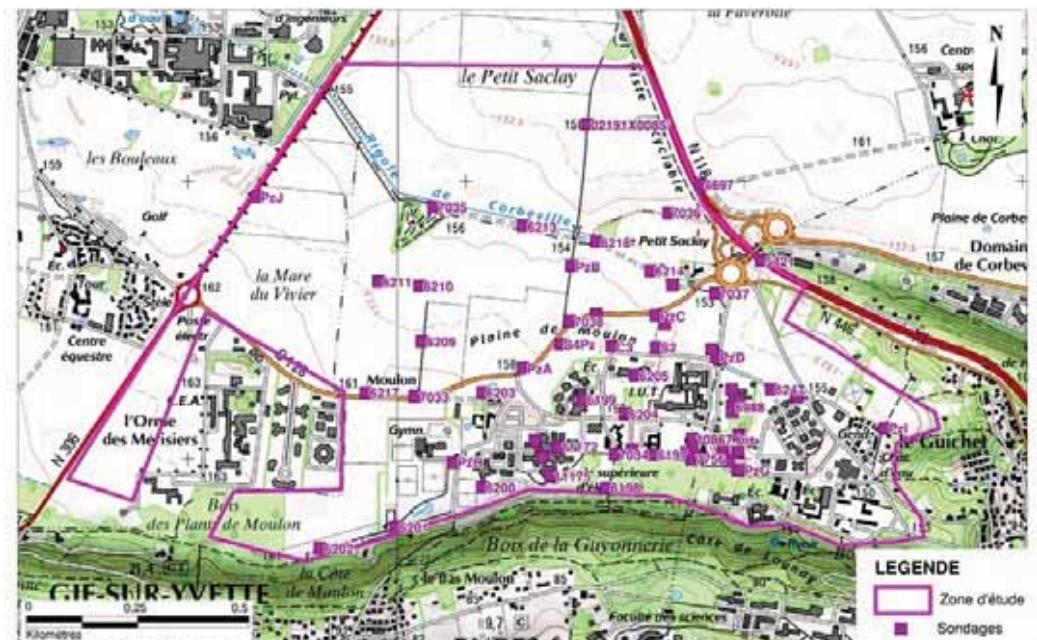
**Étude hydrogéologique par le CEREMA (Dumont, 2013), financée par la région d'Île-de-France**

- étude bibliographique (archives, rapports, thèses)
- campagne de reconnaissance géotechnique (sondages)



estimation des paramètres physiques (initiaux)

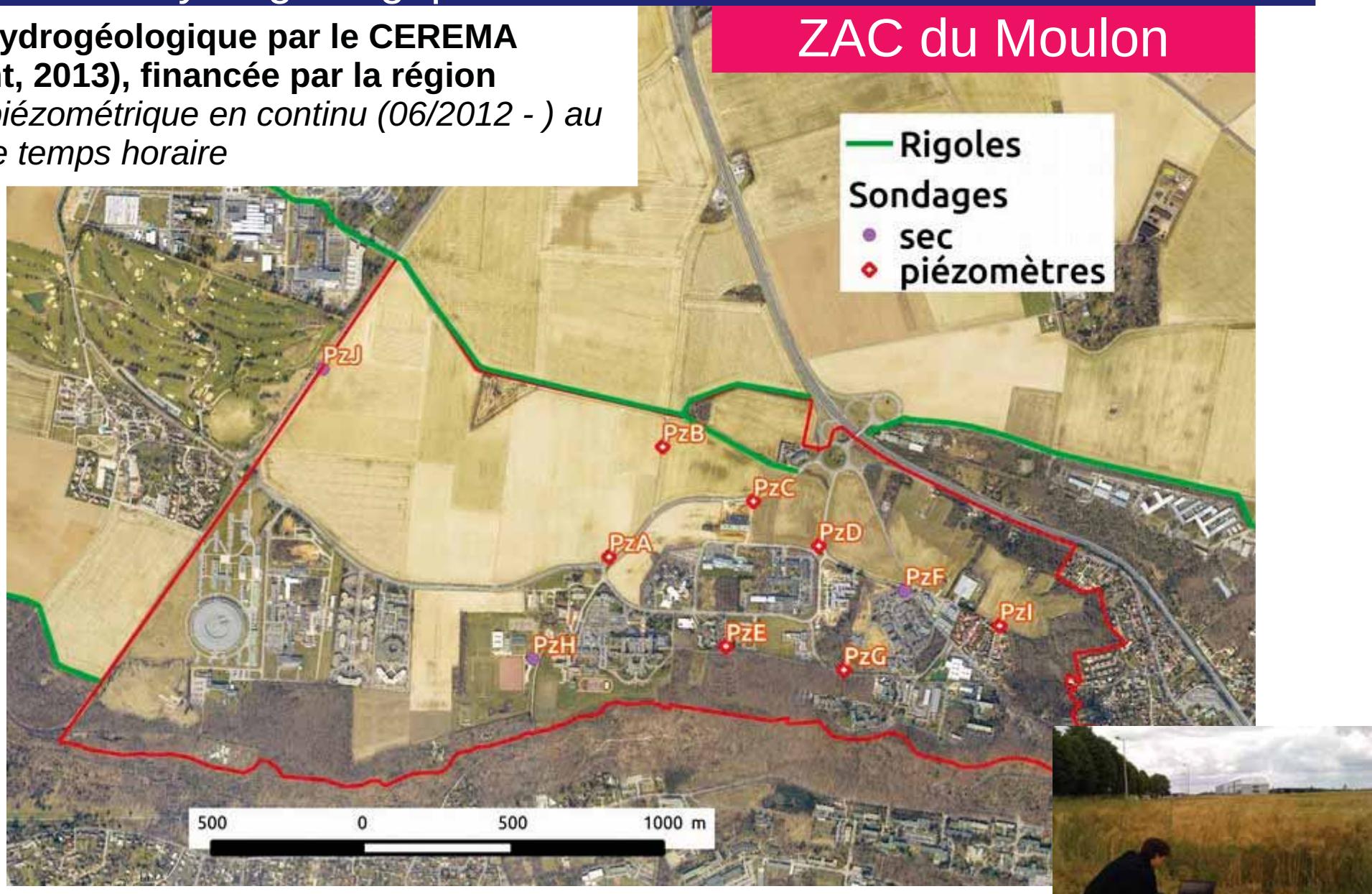
anciens points de sondage du CEREMA



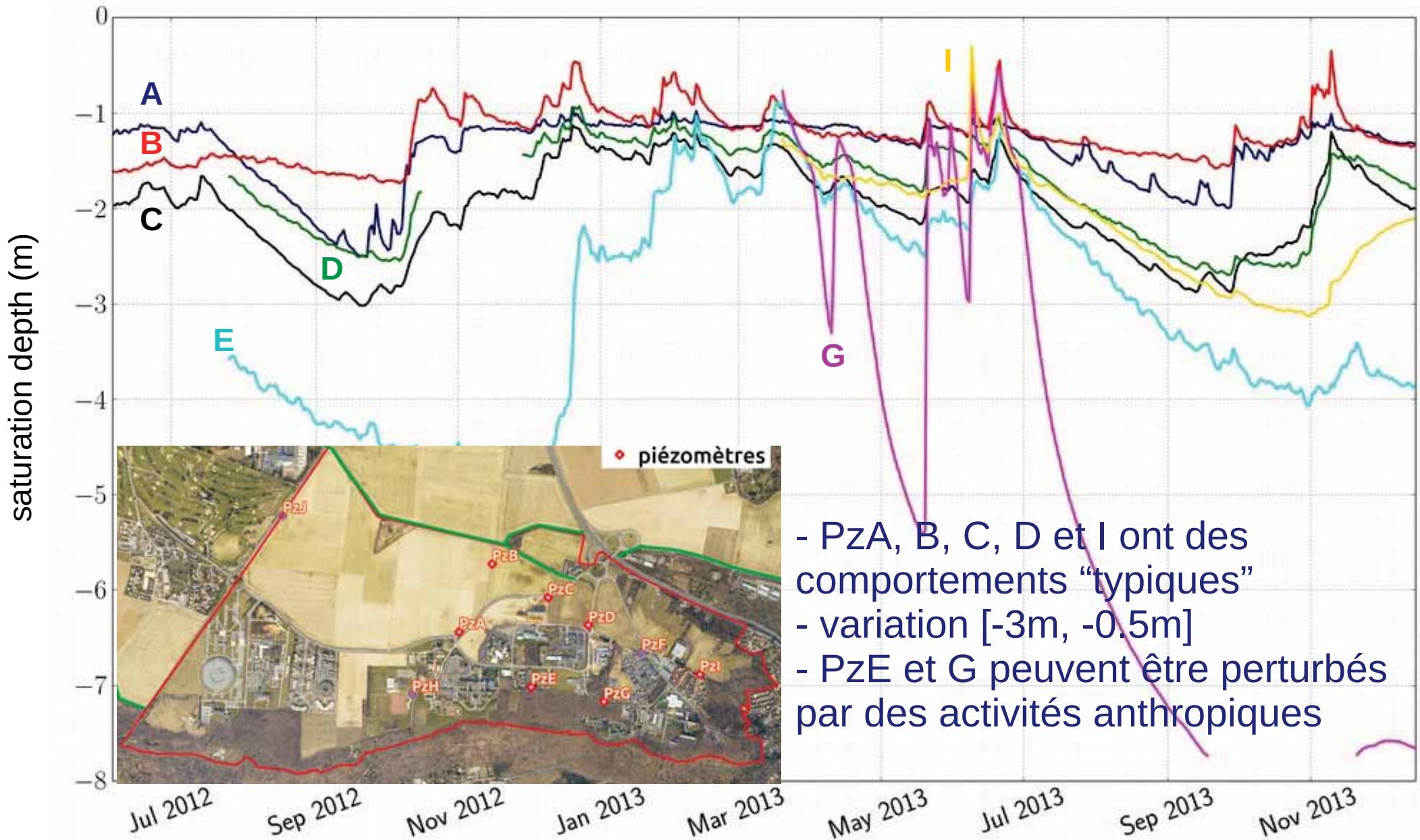
### III.1 Contexte hydrogéologique

Étude hydrogéologique par le CEREMA  
(Dumont, 2013), financée par la région

- suivi piézométrique en continu (06/2012 - ) au pas de temps horaire



## III.1 Contexte hydrogéologique



## III.2 Modélisation pour l'état actuel - démarche

démarche**Préparation de données géographiques  
(SIG)**

- *mise en forme des données existantes*
- *création de la couche des réseaux EP à partir de tracés Autocad (stage Master de Q. Zhou)*
- *création d'UHEs et d'Interfaces*

## III.2 Modélisation pour l'état actuel - démarche

démarche

## Préparation de données géographiques (SIG)

- *mise en forme des données existantes*
- *création de la couche des réseaux EP à partir de tracés Autocad (stage Master de Q. Zhou)*
- *création d'UHEs et d'Interfaces*

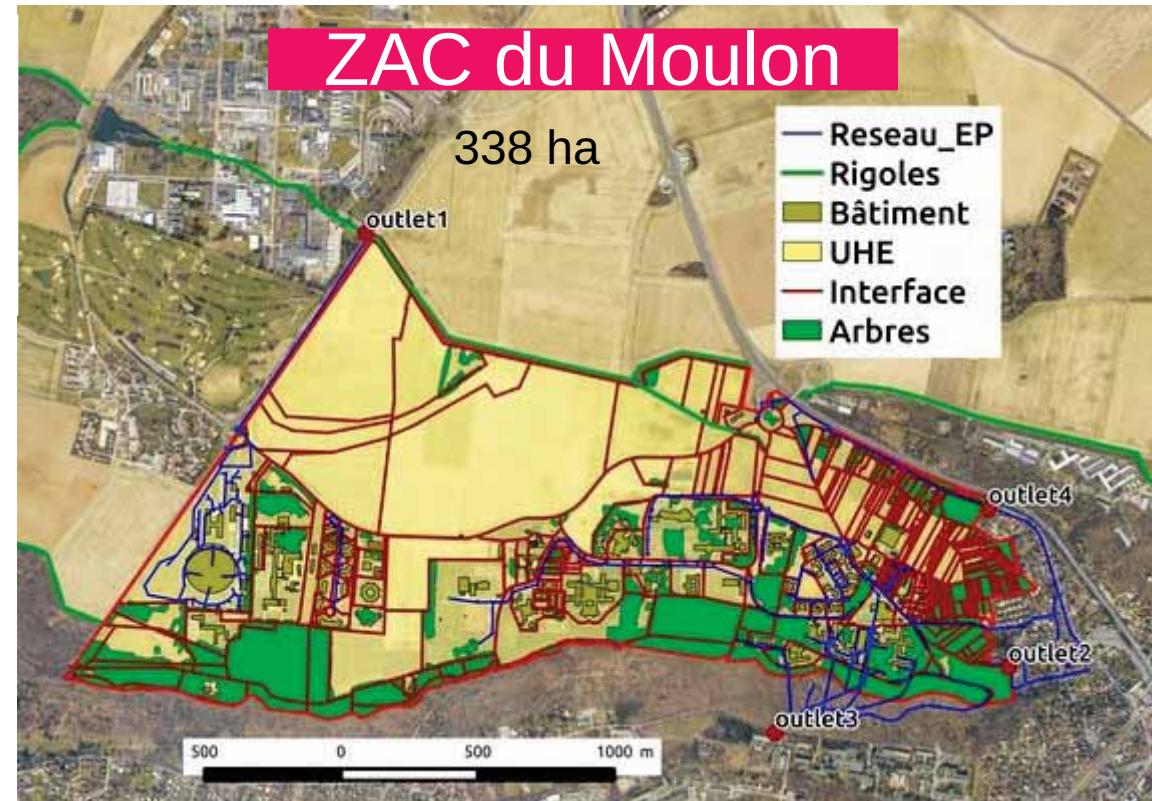


## III.2 Modélisation pour l'état actuel - démarche

démarche

## Préparation de données géographiques (SIG)

- *mise en forme des données existantes*
- *création de la couche des réseaux EP à partir de tracés Autocad (stage Master de Q. Zhou)*
- *création d'UHEs et d'Interfaces*



## III.2 Modélisation pour l'état actuel - démarche

démarche

## Préparation de données géographiques (SIG)

- *mise en forme des données existantes*
- *création de la couche des réseaux EP à partir de tracés Autocad (stage Master de Q. Zhou)*
- *création d'UHEs et d'Interfaces*



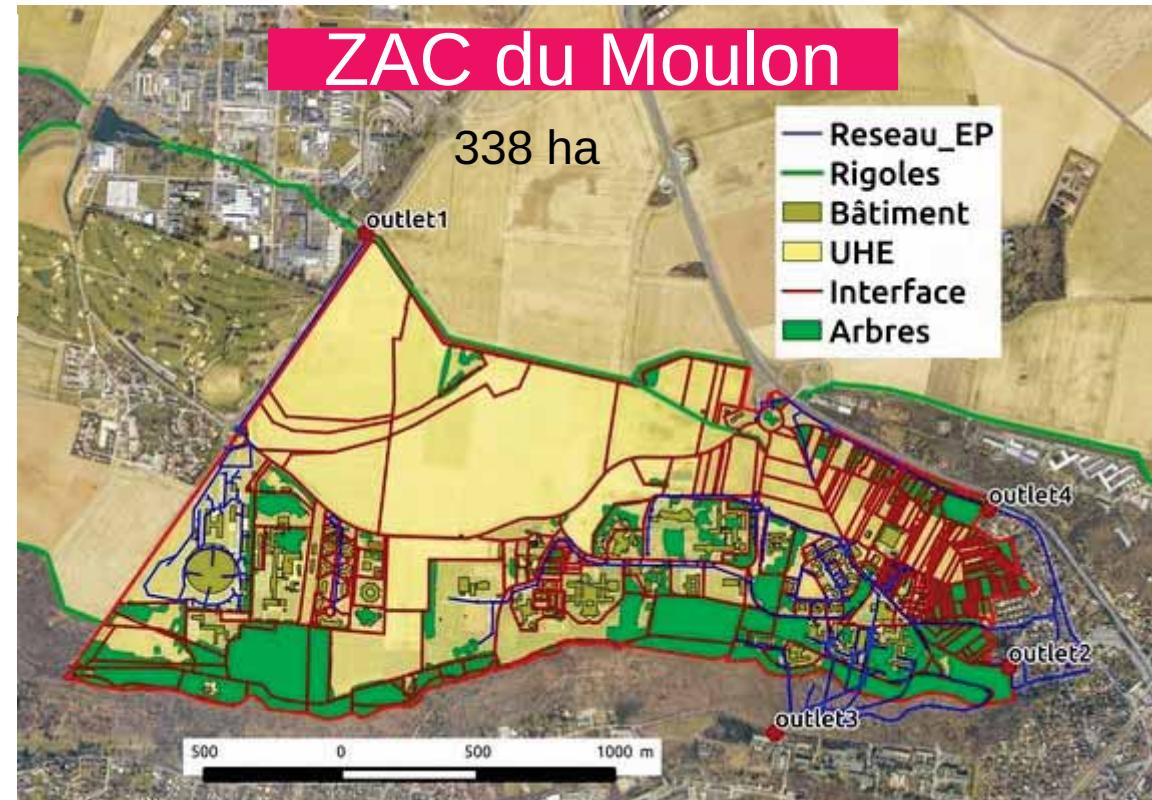
Simulation initiale avec paramètres estimés



Étude de sensibilité & calage de paramètres



Simulation finale par modèle calé



## III.2 Modélisation pour l'état actuel - démarche

démarche

## Préparation de données géographiques (SIG)

- *mise en forme des données existantes*
- *création de la couche des réseaux EP à partir de tracés Autocad (stage Master de Q. Zhou)*
- *création d'UHEs et d'Interfaces*



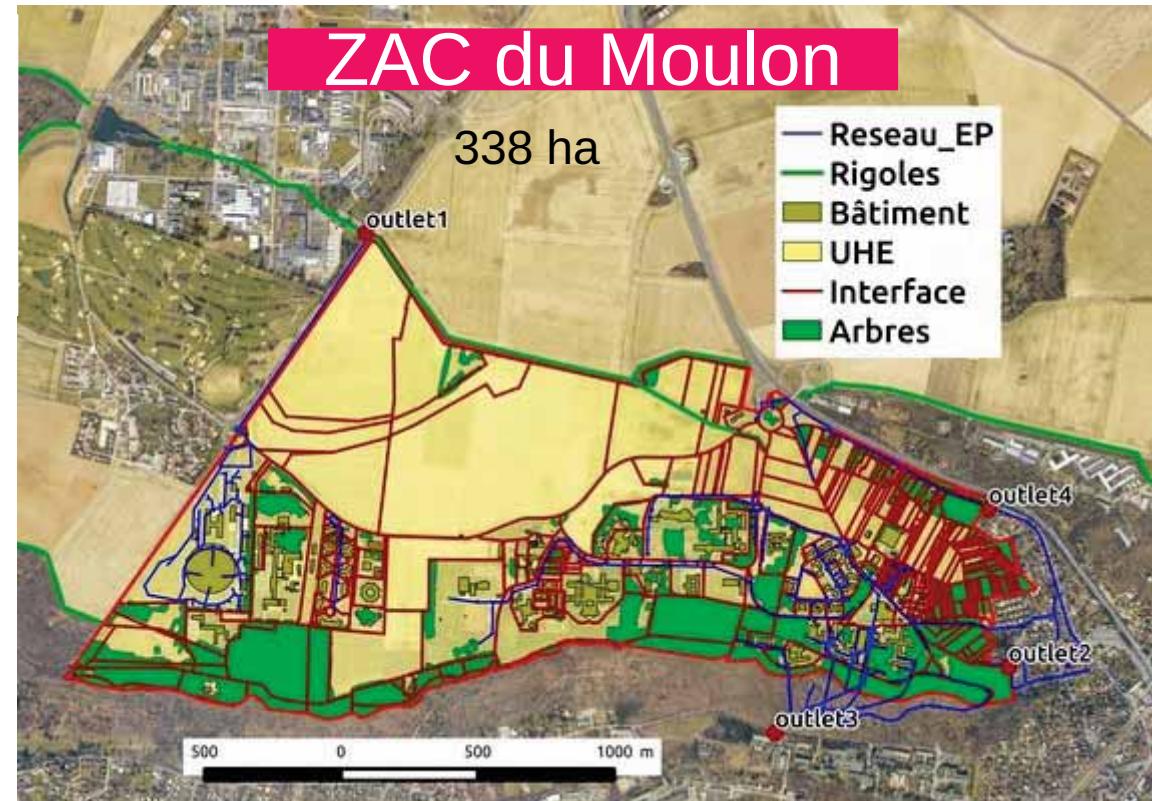
**Simulation initiale avec paramètres estimés**



**Étude de sensibilité & calage de paramètres**



**Simulation finale par modèle calé**



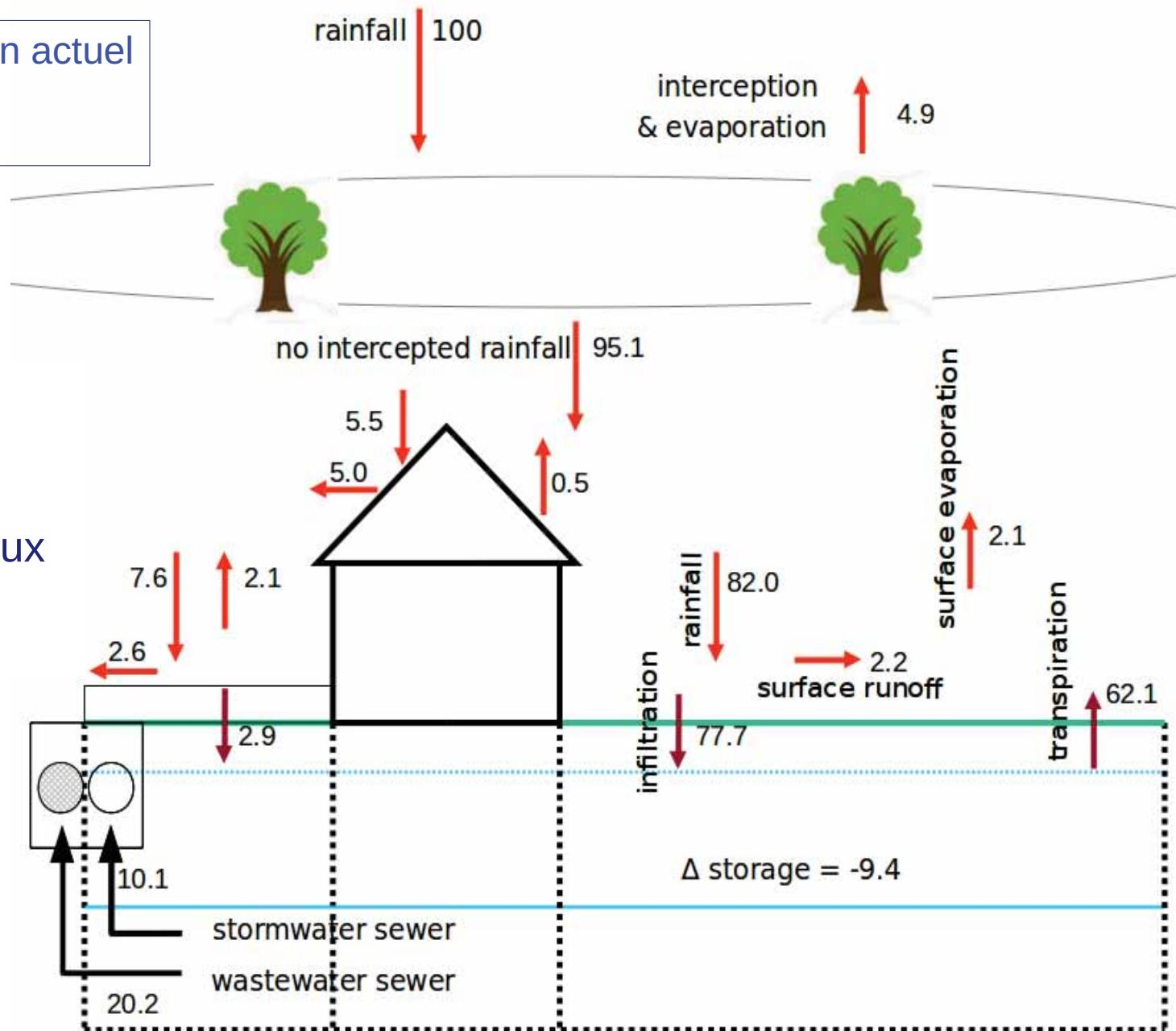
évaluation et calage uniquement sur les niveaux piézométriques

- *période : 01/01/2011-31/12/2013*
- *pas de temps : 6min*

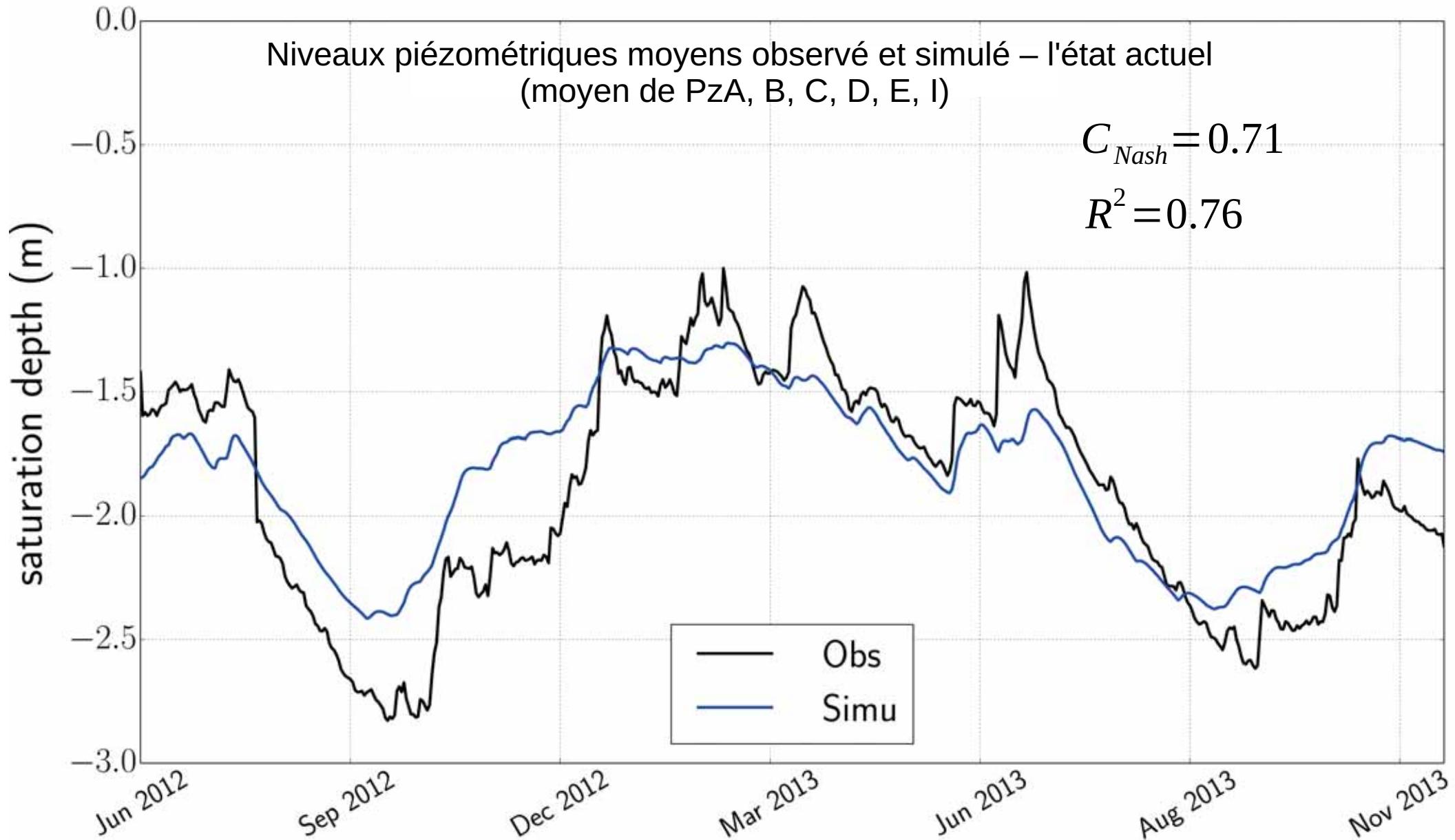
## III.2 Modélisation pour l'état actuel - résultat

Bilan hydrologique du Moulon actuel  
2011-2013  
(par modèle calé)

- rôles importants des processus de
  - 1) évapotranspiration
  - 2) drainage des réseaux
- bilan non validé (pas de mesure)



## III.2 Modélisation pour l'état actuel - résultat



## III.3 Modélisation pour l'état futur - démarche

démarche**Préparation de données géographiques**

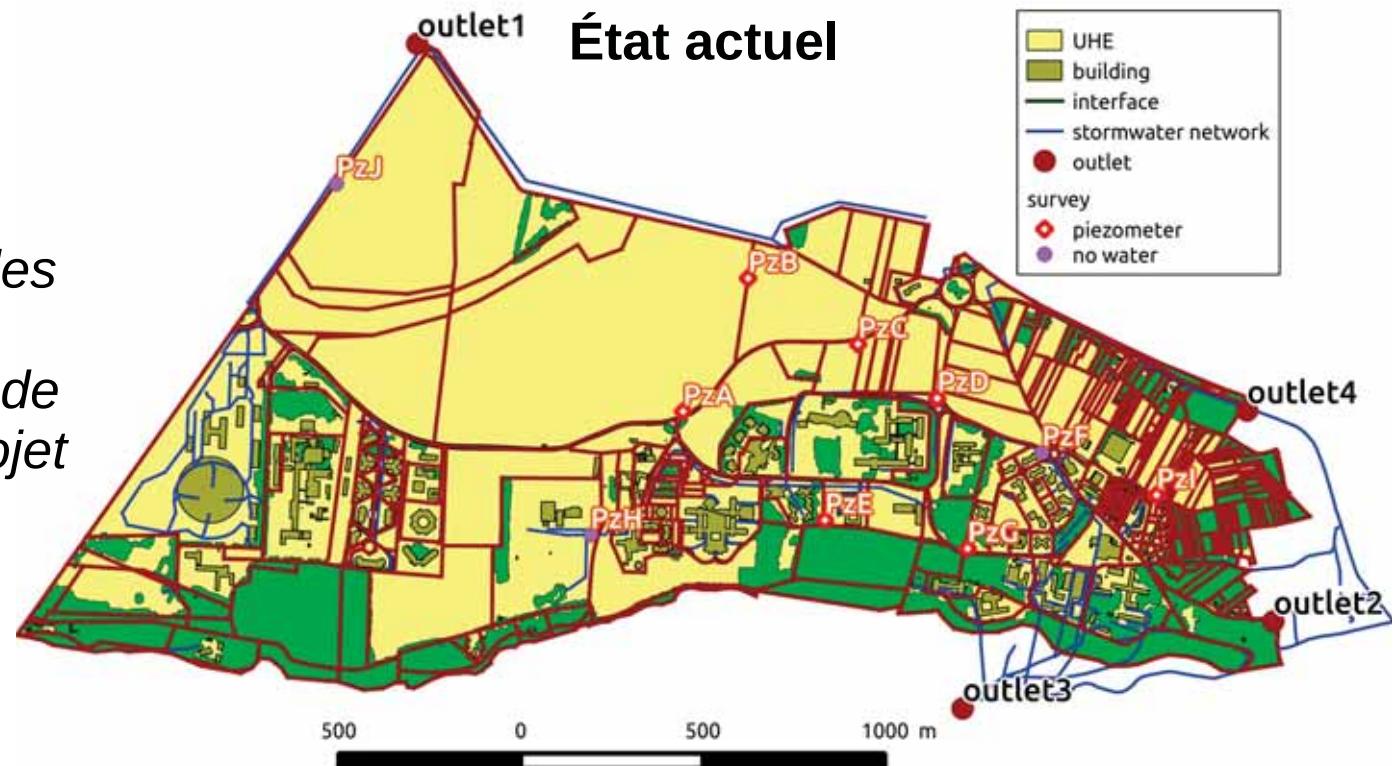
- îlots et bâtiments : disponibles (EPPS)
- réseaux d'EP : créé à partir de documents techniques du projet (stage Master de K. Farias)

## III.3 Modélisation pour l'état futur - démarche

démarche

## Préparation de données géographiques

- îlots et bâtiments : disponibles (EPPS)
- réseaux d'EP : créé à partir de documents techniques du projet (stage Master de K. Farias)



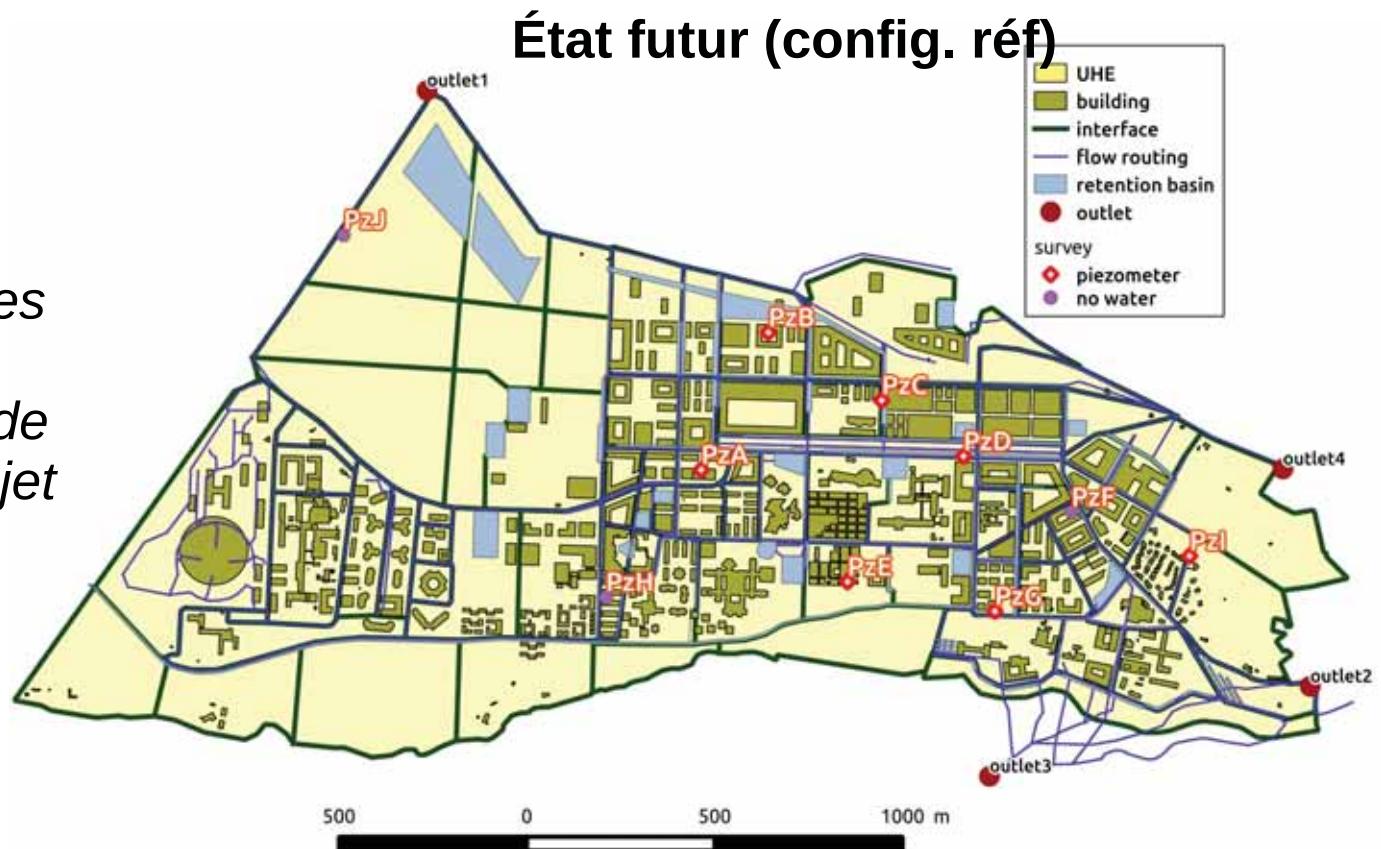
- 379 parcelles (UHEs)
- réseau EP : 19604 m

## III.3 Modélisation pour l'état futur - démarche

démarche

## Préparation de données géographiques

- îlots et bâtiments : disponibles (EPPS)
- réseaux d'EP : créé à partir de documents techniques du projet (stage Master de K. Farias)



- 87 îlots (UHEs)
- réseau EP : 35076 m (noues et lanières d'infiltration comprises)

### III.3 Modélisation pour l'état futur - démarche

#### démarche

##### Préparation de données géographiques

- îlots et bâtiments : disponibles (EPPS)
- réseaux d'EP : créé à partir de documents techniques du projet (stage Master de K. Farias)



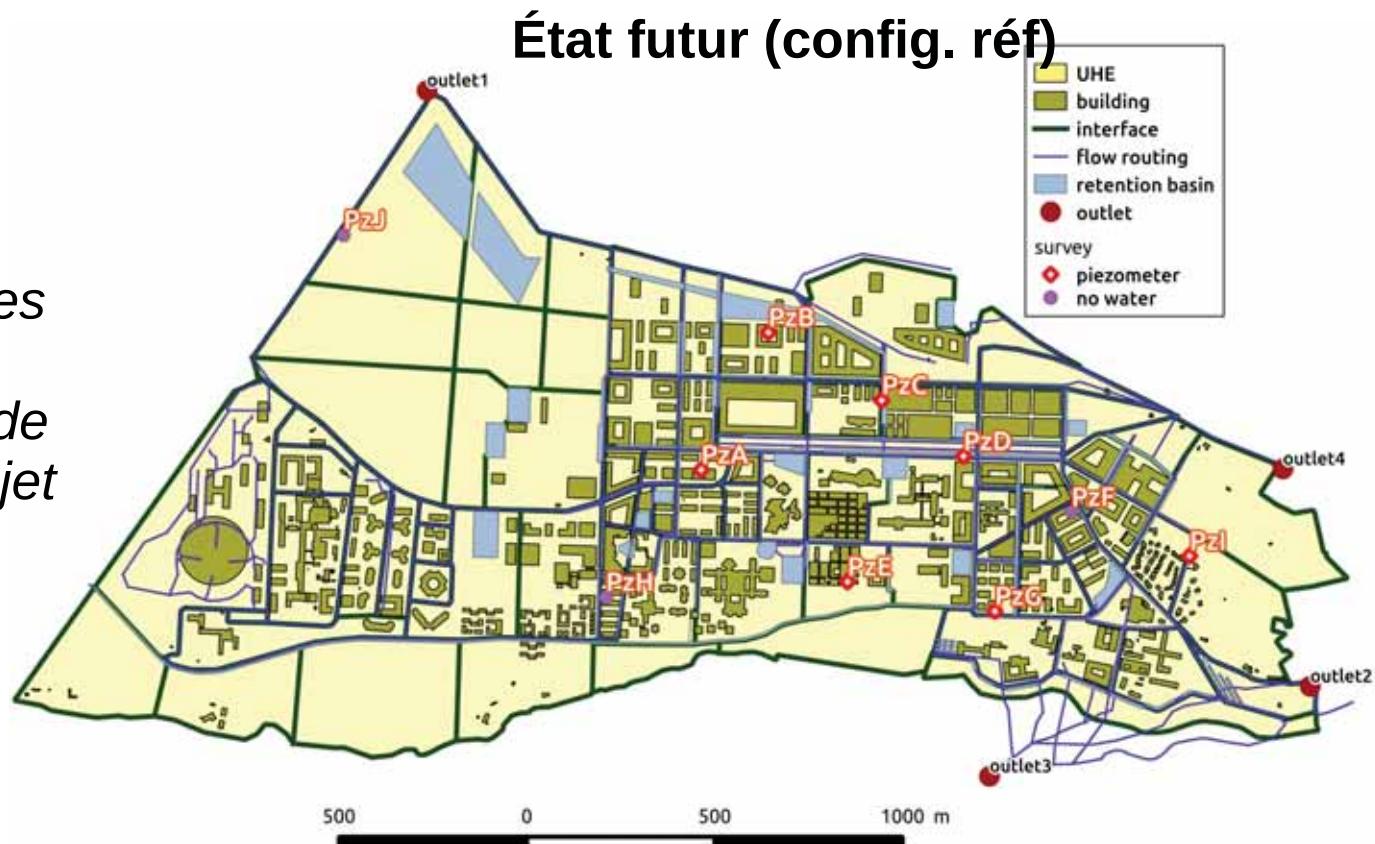
##### Simulation pour configuration de référence



##### Simulation pour des scénarios

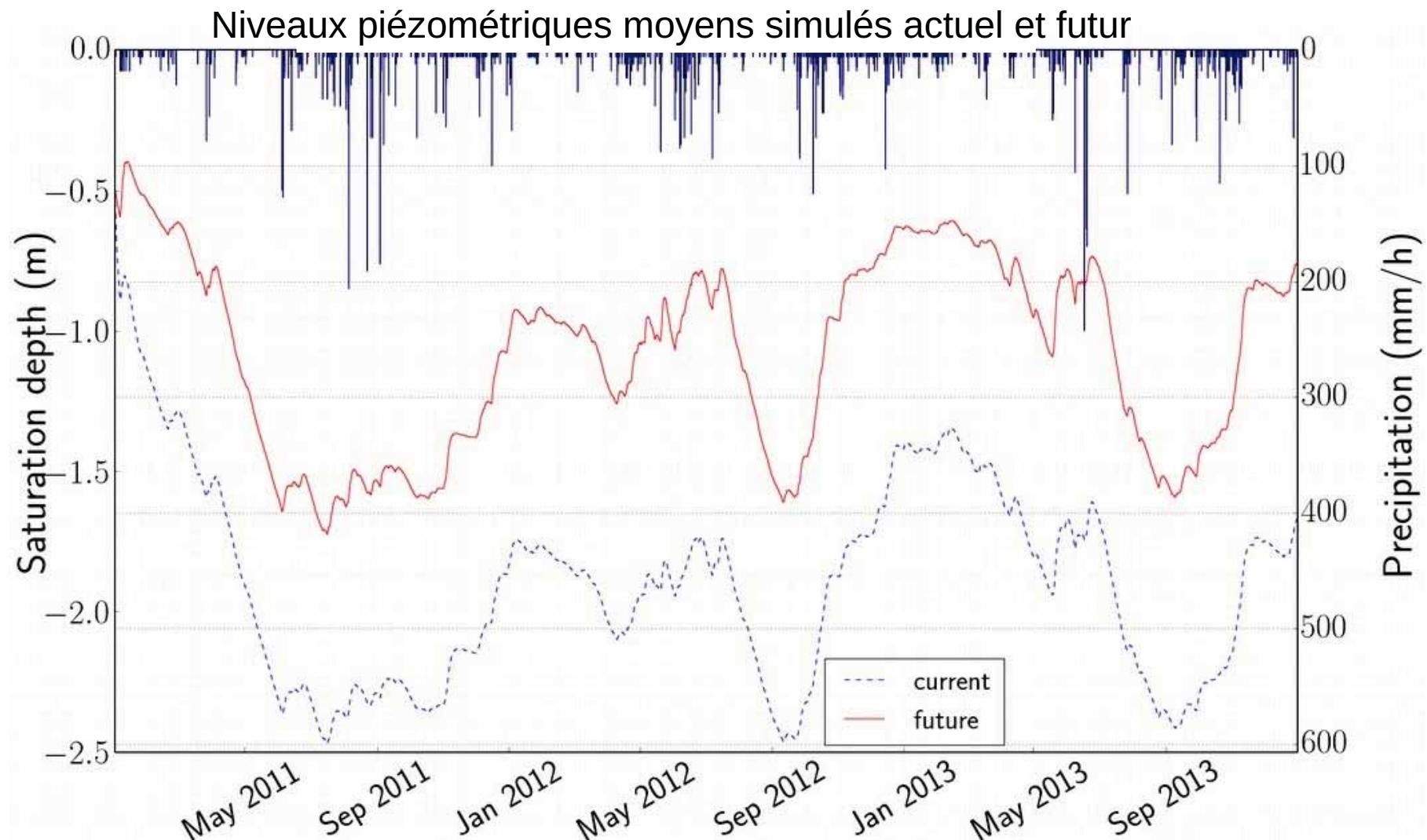
##### 2 types de scénarios testés (définis avec l'EPPS)

- niveau d'imperméabilisation (sol revêtu et bâtiments)
- techniques alternatives



- 87 îlots (UHEs)
- réseau EP : 35076 m (noues et lanières d'infiltration comprises)

## III.3 Modélisation pour l'état futur – simulation de référence



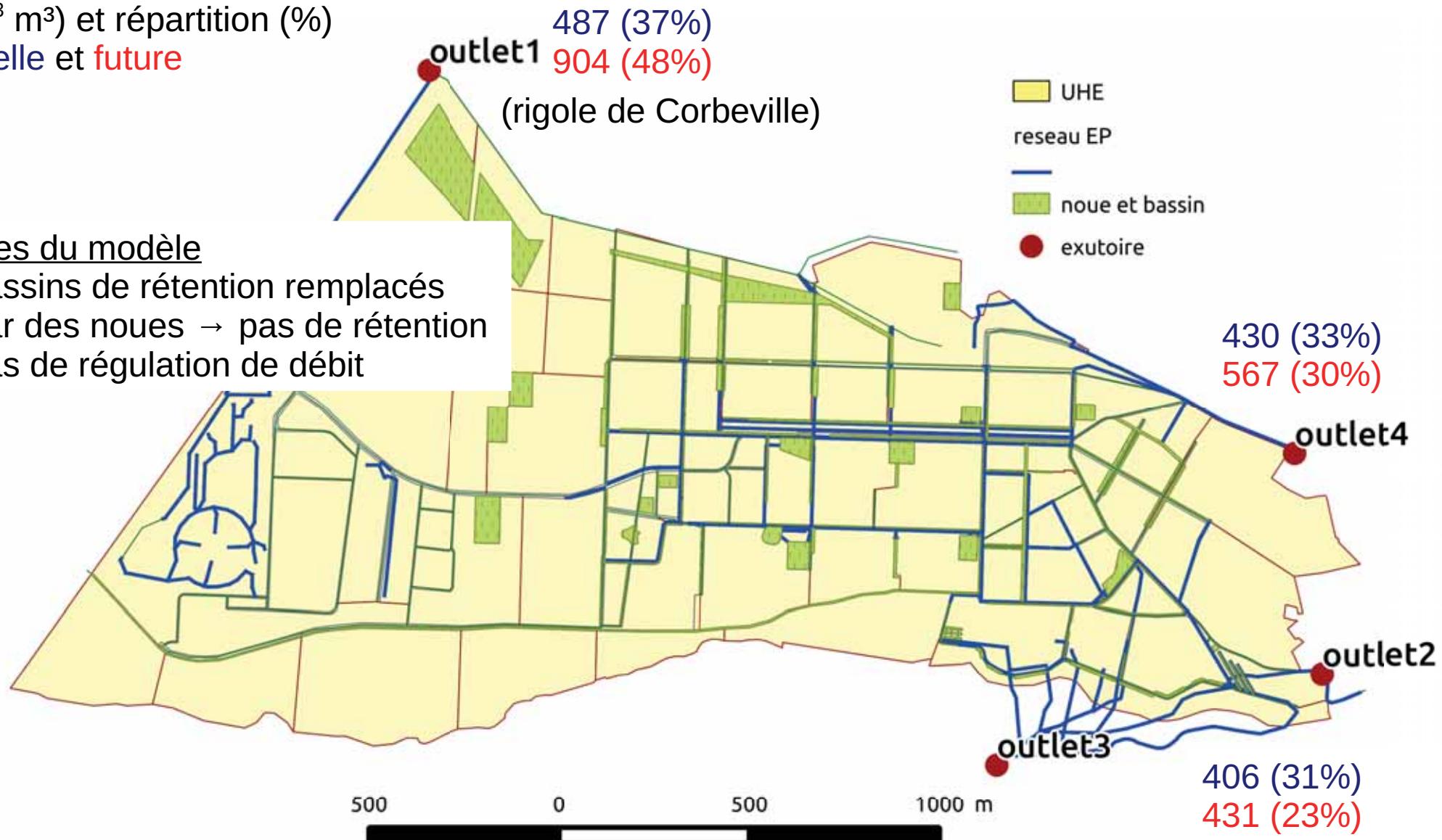
- augmentation du niveau de nappe à l'état futur
- résultat à examiner (discrétisation spatiale)

## III.3 Modélisation pour l'état futur - simulation de référence

volume d'eau sorti aux exutoires

( $\times 10^3 \text{ m}^3$ ) et répartition (%)

actuelle et future

limites du modèle

- bassins de rétention remplacés par des noues → pas de rétention
- pas de régulation de débit

## III.3 Modélisation pour l'état futur – étude de scénarios

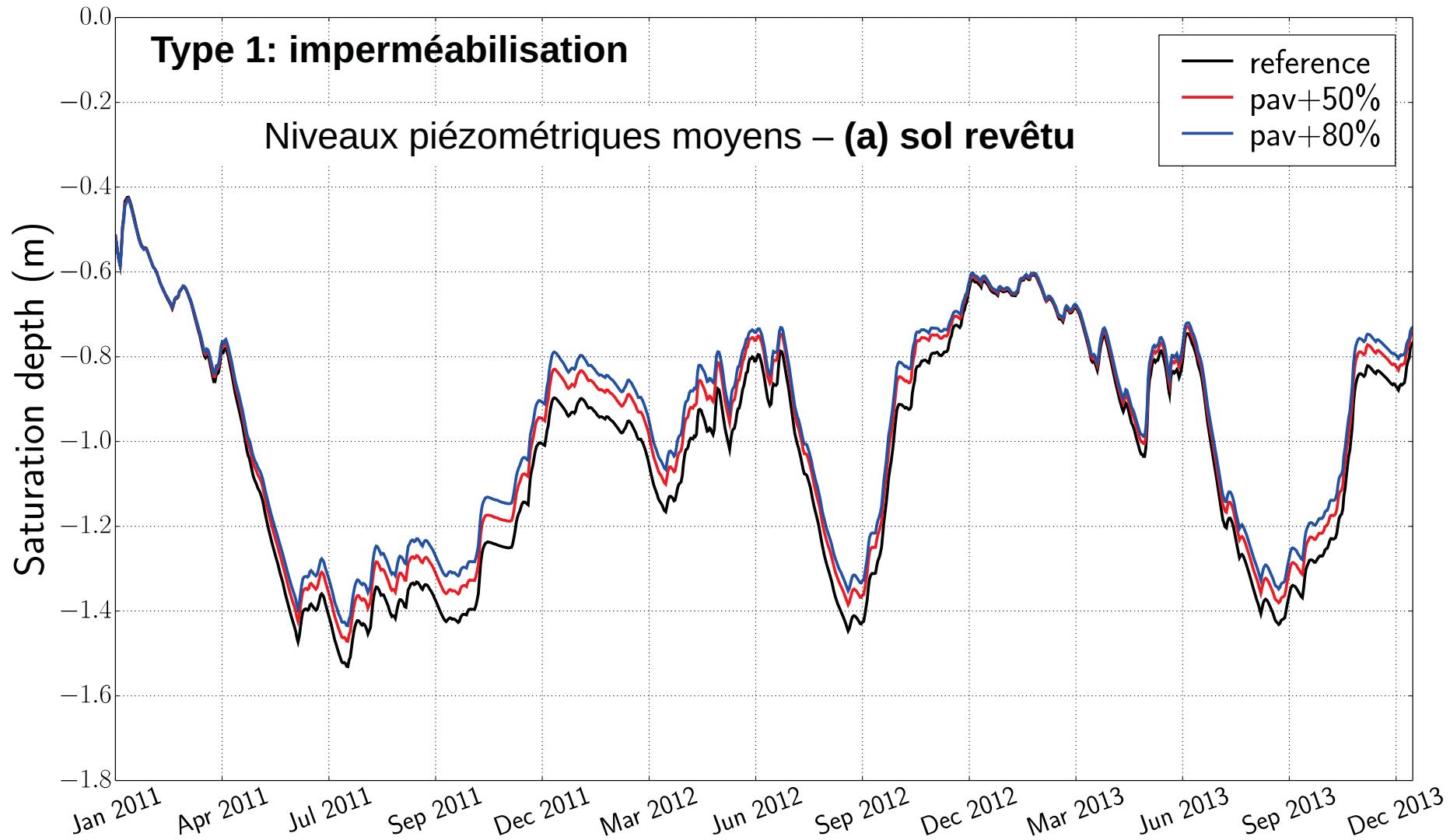
<b>Type 1: niveau d'imperméabilisation</b>		
<b>label du scénario</b>	<b>description</b>	<b>surface (ha)</b>
pav+50%	+ 50% de sols revêtus	84
pav+80%	+ 80% de sols revêtus	95
hou+50%	+ 50% de surfaces bâties	68
hou-50%	- 50% de surfaces bâties	60

différence entre un bâtiment et un sol revêtu : perméabilité

$$K_{sat}^{str} = 7.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

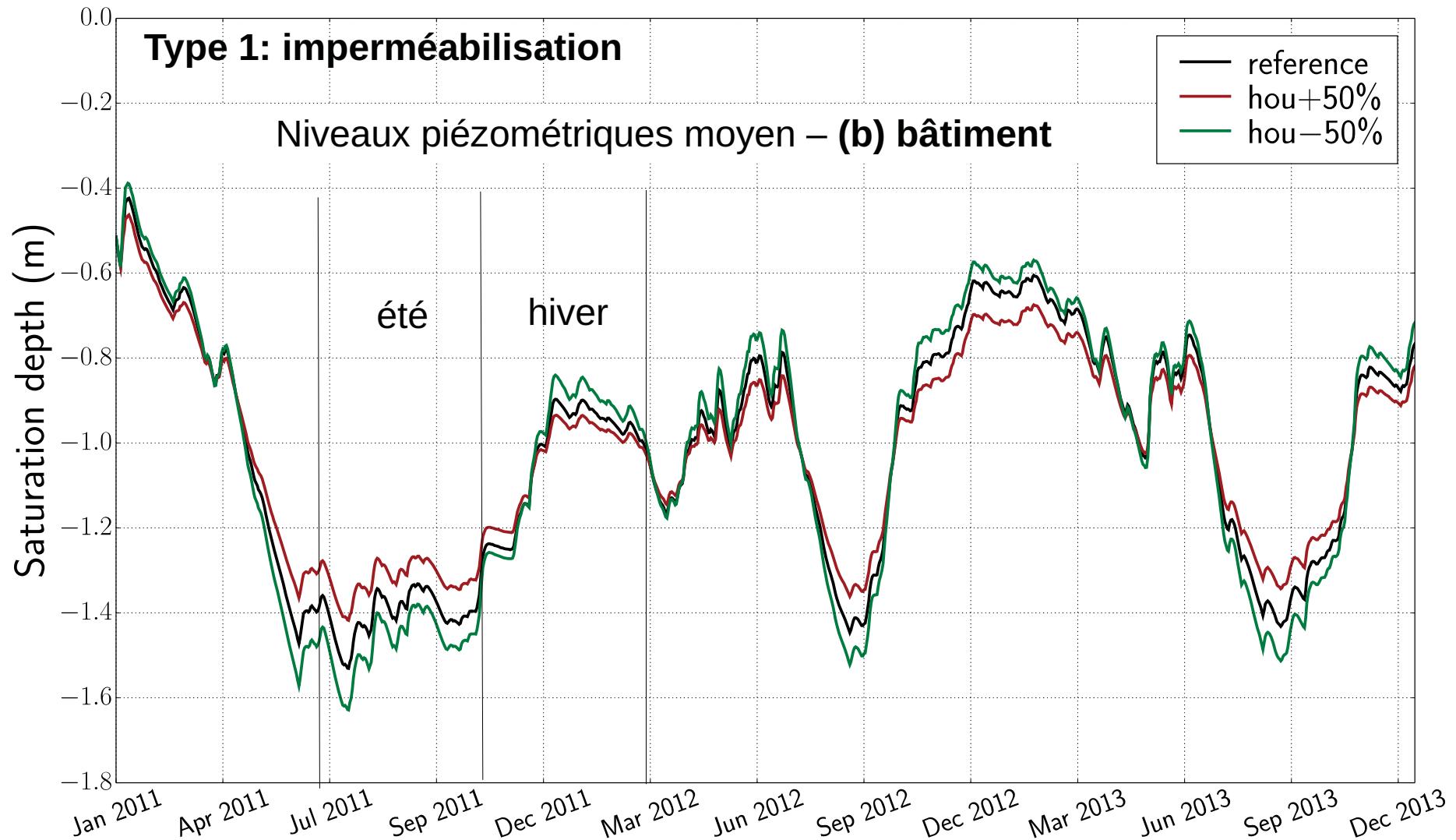
$$K_{sat}^{hou} = 0 \text{ m/s}$$

## III.3 Modélisation pour l'état futur – étude de scénarios



- sol revêtu: plus l'imperméabilisation est forte, plus le niveau de nappe augmente → effet dominant de l'évapotranspiration

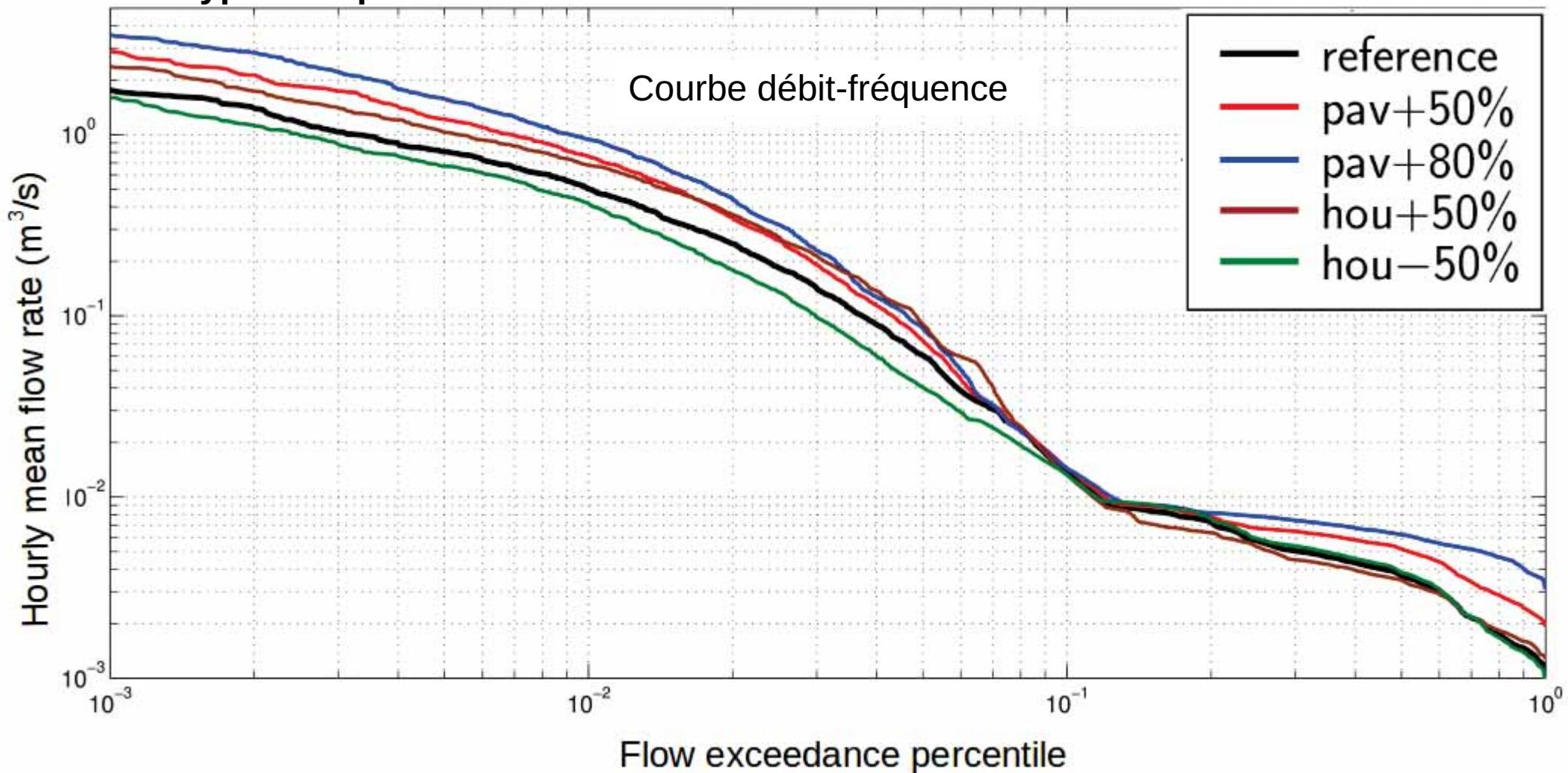
## III.3 Modélisation pour l'état futur – étude de scénarios



- bâtiment: Tendance saisonnière inversée → régimes de recharge différents

## III.3 Modélisation pour l'état futur – étude de scénarios

## Type 1: imperméabilisation

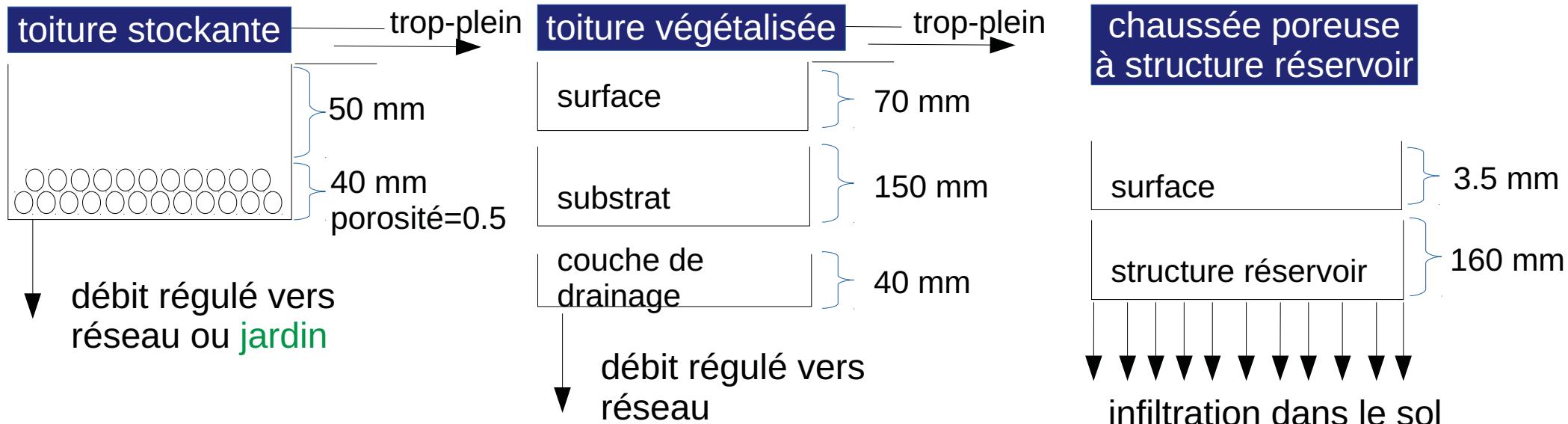


L'imperméabilisation augmente les débits de pointe et les débits de base

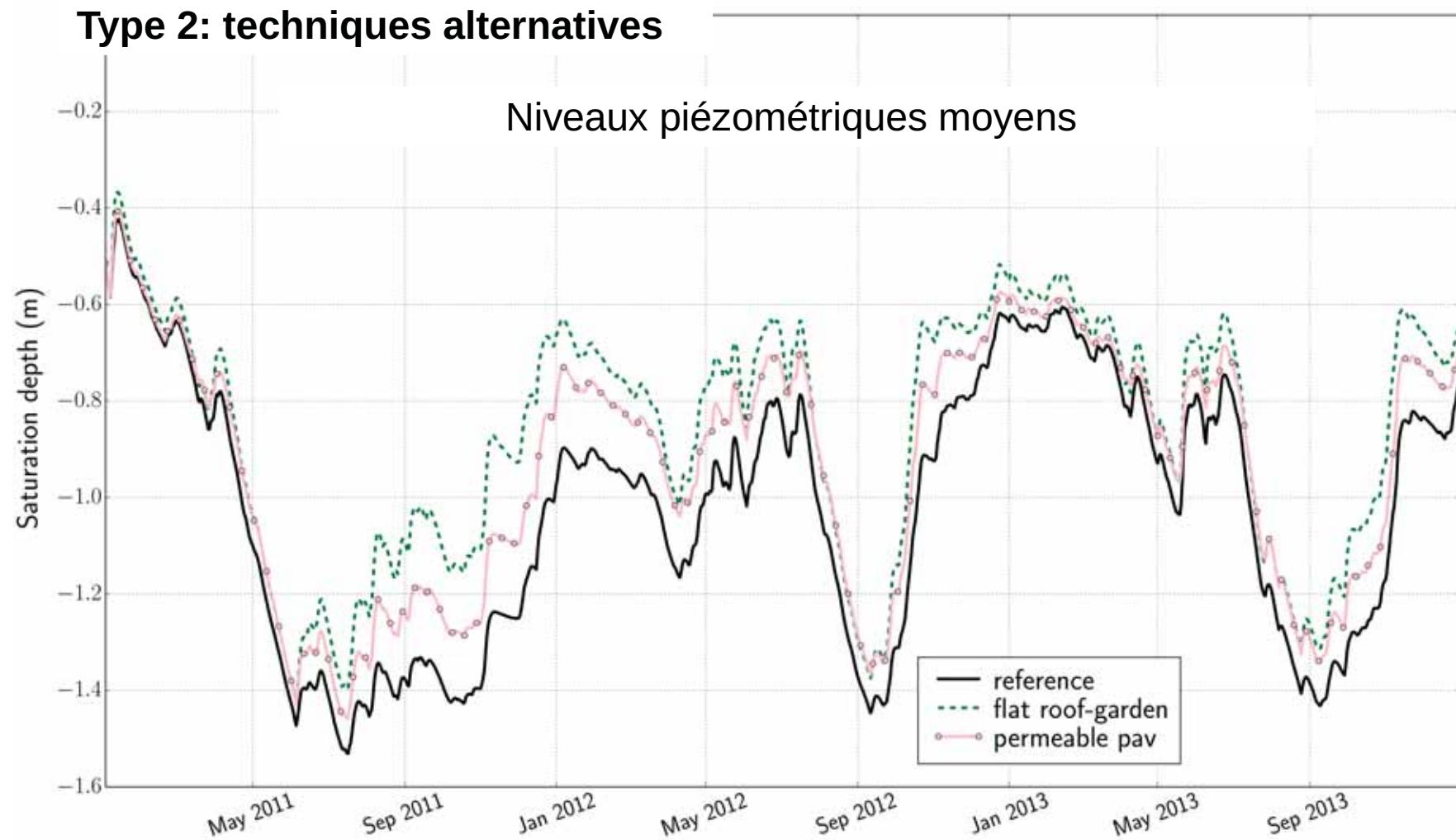
## III.3 Modélisation pour l'état futur – étude de scénarios

## Type 2: techniques alternatives

label du scénario	Description	surface (ha)
flat roof 50%	50% toitures stockantes (débit régulé)	25,5
flat roof 100%	100% toitures stockantes (débit régulé)	51
flat roof 100% - garden	100% toitures stockantes connectées au jardin	51
green roof 50%	50% de toitures végétalisées	25,5
green roof 100%	100% de toitures végétalisées	51
permeable pav	chaussées poreuses à structure réservoir	64



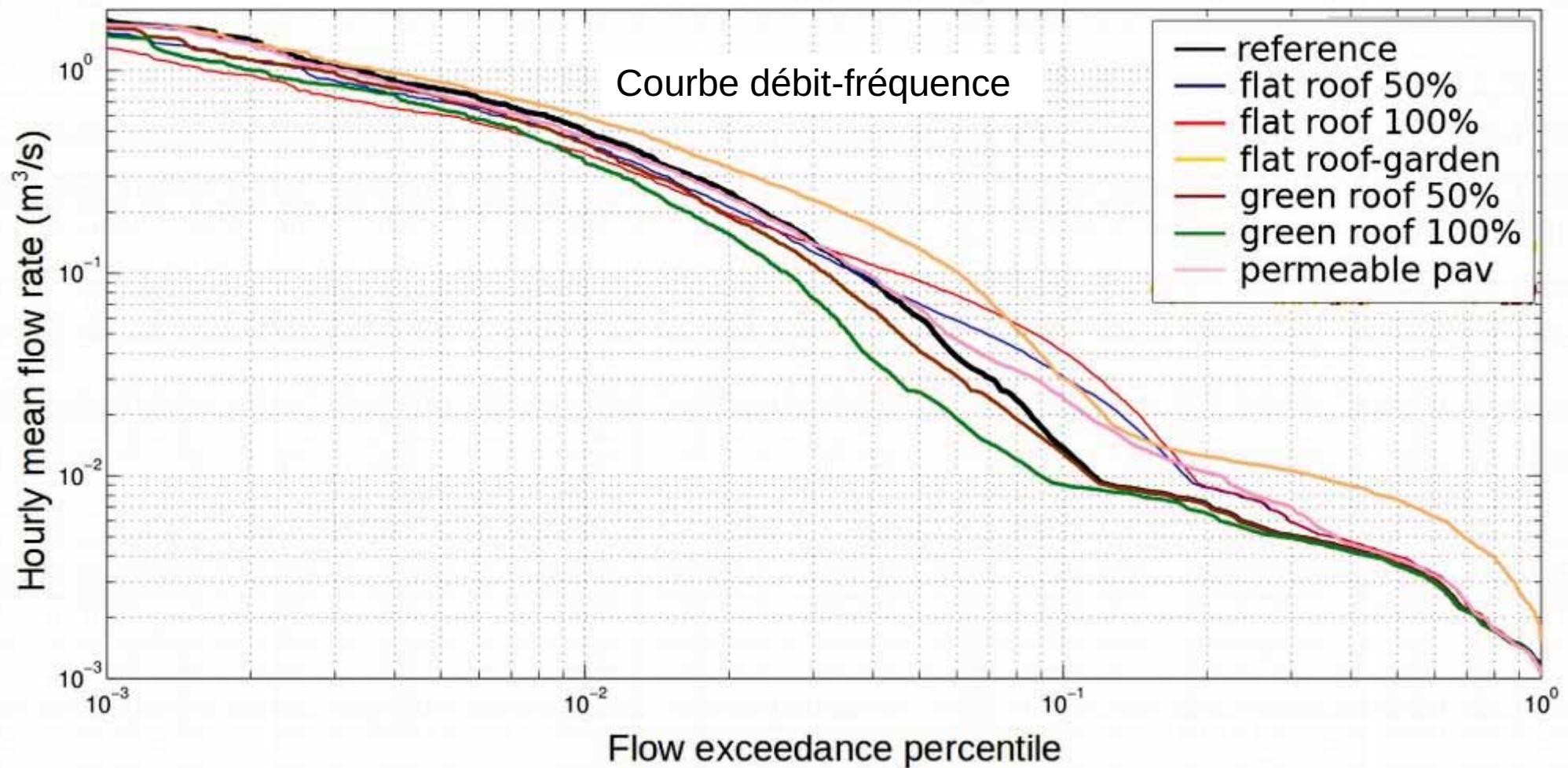
## III.3 Modélisation pour l'état futur – étude de scénarios



- Toitures stockantes connectées au jardin et chaussées poreuses à structure réservoir peuvent augmenter le niveau de nappe
- Les autres techniques alternatives n'influencent pas beaucoup la nappe

## III.3 Modélisation pour l'état futur – étude de scénarios

## Type 2: techniques alternatives



Les techniques alternatives peuvent écrêter les débits de pointe

## III.3 Résumé de Phase 2

- Le modèle URBS-WTI a été appliqué sur le site du Moulon.
- L'étude a montré des résultats intéressants, tant sur l'impact du projet d'aménagement que sur l'impact des techniques alternatives.
- Les résultats comportent des incertitudes (hypothèse émises, représentativité du modèle) et nécessitent d'être confortés.



**I. Contexte**

**II. Phase 1: Intégration d'un module saturé dans un modèle hydrologique et évaluation sur le bassin versant du Pin Sec**

**III. Phase 2: Application sur le projet d'aménagement du Moulon**

**IV. Conclusion, discussion et perspectives**

## Conclusion

### Conclusion

- module saturé WTI intégré dans URBS et validé sur un bassin versant instrumenté
- calage du modèle basé sur les niveaux piézométriques (original)
- capacité du modèle à simuler le niveau de nappe
- qualité de simulation non impactée pour le débit et le bilan hydrologique
- bilan hydrologique du Moulon estimé par le modèle, ainsi que l'impact du projet d'aménagement
- améliorations en termes d'ergonomie (non présentées ici)

## Discussion et perspective

### Discussion

#### i) sur l'étude

- résultats pour l'état actuel du Moulon **non validés** (pour les débits)
- **réalisme** des résultats pour l'état futur Moulon discutable : hypothèses, représentation des processus, ...

#### ii) sur le modèle

- **adaptabilité** à la taille d'un projet d'aménagement (~ centaines d'hectares)
- capacité à étudier les scénarios d'aménagement
- effort important pour le **pré-traitement géographique**
- demande de données précises sur les réseaux

### Perspectives

- revoir certaines **hypothèses** sur l'occupation des sol du Moulon aménagé
- **comparer** les résultats avec d'autres études disponibles (stages de master en cours)
- **améliorer** le modèle (représentation de l'hétérogénéité spatiale du sol, estimation d'incertitude sur les paramètres, flexibilité du code)
- 2 **modules à développer** dans l'immédiat : (1) drainage aux fondations et pompage (2) régulation de débits dans les noues



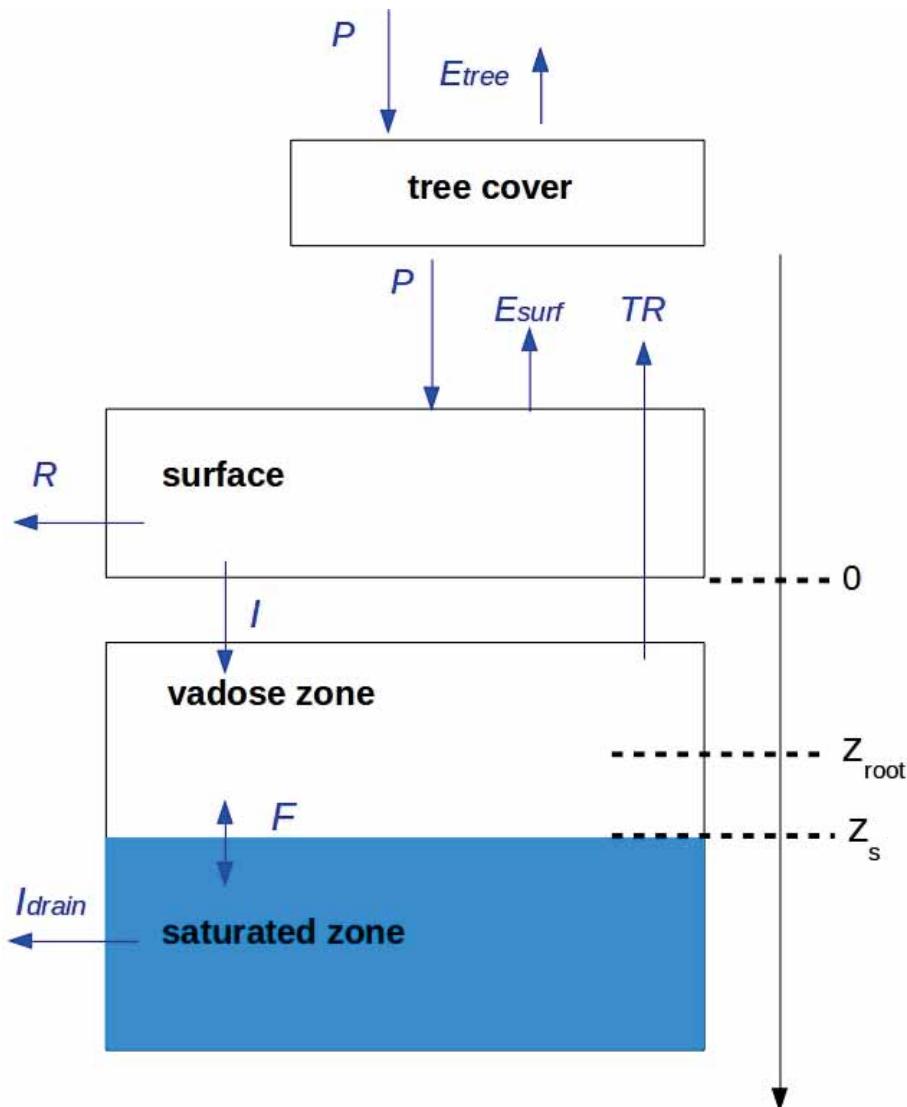
Merci pour votre attention!!



## • Référence

- Branger, F., 2007. Utilisation d'une plate-forme de modélisation environnementale pour représenter le rôle d'aménagement hydro-agricoles sur les flux d'eau et de pesticides: application au bassin de la Fontaine du Theil (Ille-et-Vilaine). INP Grenoble.
- Dumont, E., Krezia, C., Diome, C. and Bogaert, M. (2013). Projet scientifique SACALY – Synthèse géologique et hydrogéologique. Technical report, CEREMA – Direction territoriale île-de-France.
- Jankowfsky, S., 2001. Understanding and modelling of hydrological processes in small peri-urban catchments using an object oriented and modular distributed approach. Application to the Chaudanne and Mercier sub-catchments (Yzeron catchment, France). École doctorale Terre, Univers, Environnement, Université de Grenoble, 351 pp.
- Morena, F (2004). Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Paillé, Y., 2010. Automatisation du prétraitement des données spatiales pour la modélisation hydrologique distribuée en zone périurbaine à l'aide du logiciel libre GRASS. Université de Nantes.
- Rodriguez, F., Andrieu, H. and Morena, F (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas – model development and application to case studies. Journal of Hydrology, 351(34) : 268-287.
- Le Delliou, A. L. (2009). Rôle des interactions entre les réseaux d'assainissement et les eaux souterraines dans le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant en milieu urbanisé – Approches expérimentales et modélisations. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, France.

# Information supplémentaire



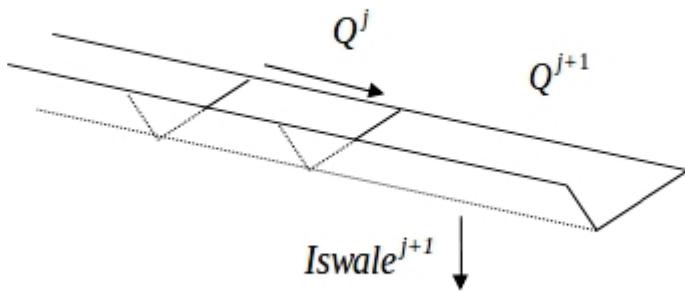
$$TR = ETP \frac{\theta - \theta_{fl}}{\theta_s - \theta_{fl}} \quad \text{si} \quad S_s \neq 0$$
$$TR = 0 \quad \text{sinon}$$

## Équation du bilan (UHE et bassin versant)

$$\text{Bilan} = \text{Pluie} + Q_{WTI} - ET - Q_{sur}^{tot} - \Delta S_s - \Delta S_{arbre} - \Delta S_{zns} + \Delta d$$



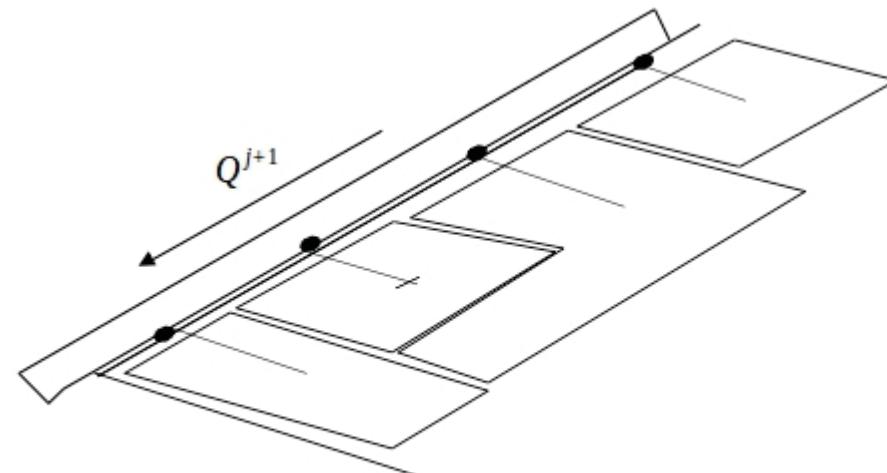
$$Q^{j+1}[t+\Delta t] = C_0 Q^j[t+\Delta t] + C_1 Q^j[t] + C_2 Q^{j+1}[t] - Iswale^{j+1}[t]$$



(a)

une noue a deux fonctions :

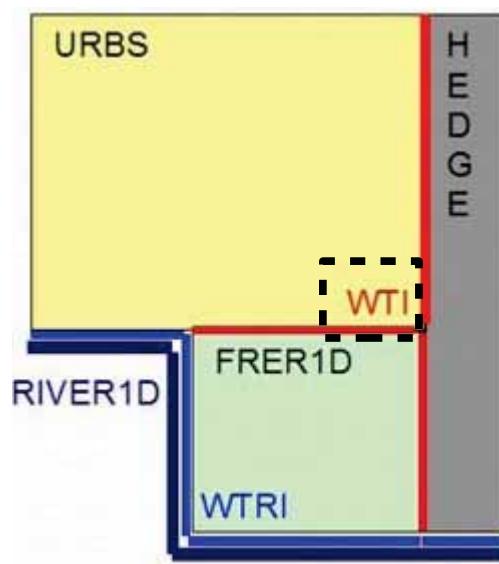
1. fonction du transfert de flux  
(Schéma Muskingum dans Rodriguez, 2003)
2. infiltration vers le sol sous la noue



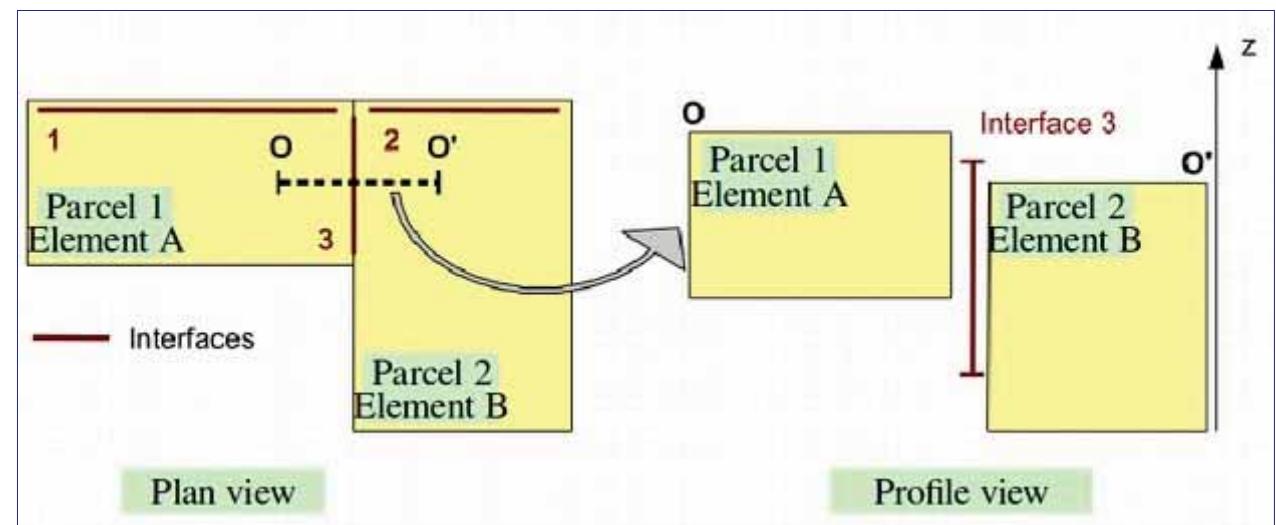
(b)

l'eau infiltrée sous la noue est répartie dans les sols des UHEs adjacents

## II.2 Intégration du WTI - Principe du module WTI



## Le WTI (Water Transfer Interface)

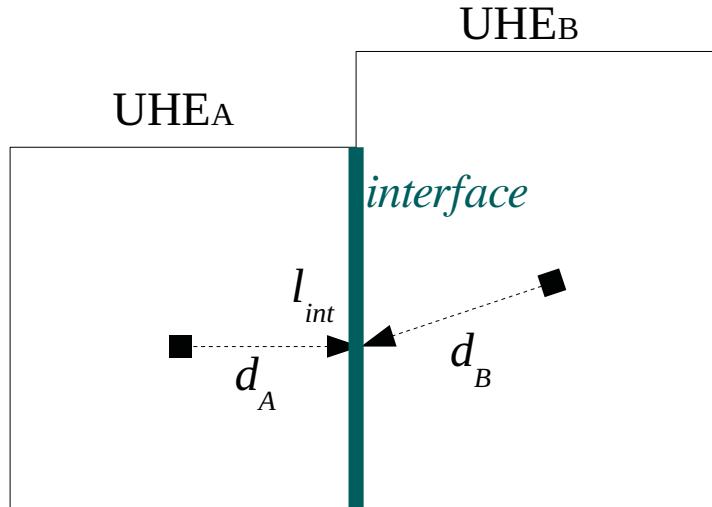


- développé par [Branger, 2007], [Jankowfsky, 2011]
- simulation des flux saturés entre deux parcelles par la loi de Darcy

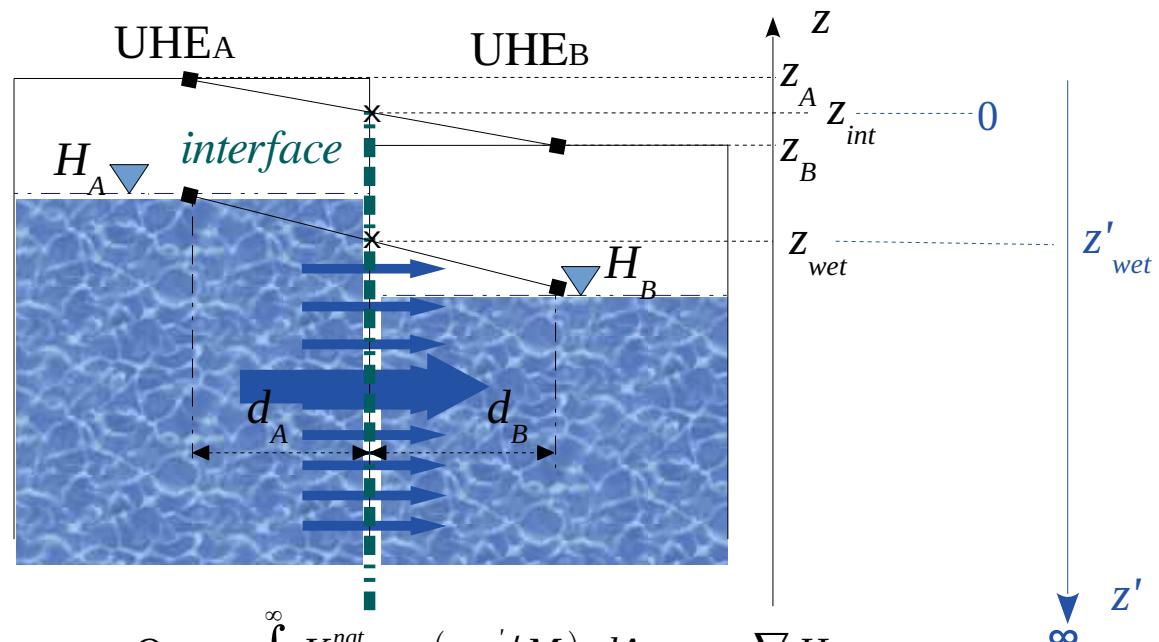


## II.1 Intégration du WTI – formulation mathématique

(a) vue de dessus



(b) coupe verticale



$$Q_{A \rightarrow B} = K_{interface} A_{interface} \nabla H$$

?

$$\frac{H_A - H_B}{d_A + d_B}$$

dans URBS :

-  $K$  décroît en profondeur

$$K_{sat}(z) = K_s \exp(-z/M)$$

- pas de substrat au fond

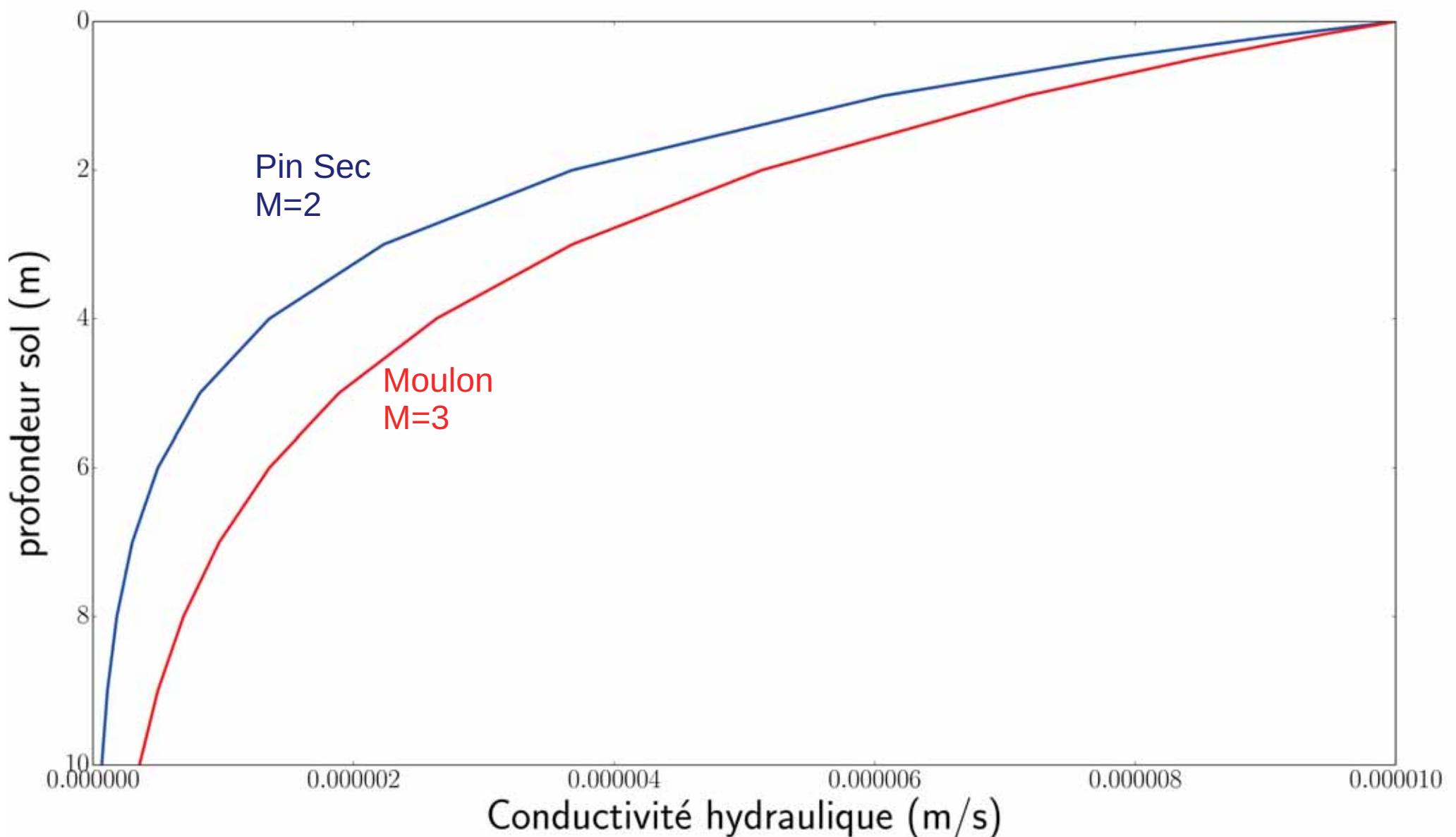
$$Q_{A \rightarrow B} = \int_{z_{wet}}^{\infty} K_s^{nat} \exp(-z'/M) \cdot dA_{interface} \cdot \nabla H$$

$$Q_{A \rightarrow B} = \int_{z_{wet}}^{\infty} K_s^{nat} \cdot l_{interface} \cdot \nabla H \cdot \exp(-z'/M) \cdot dz'$$

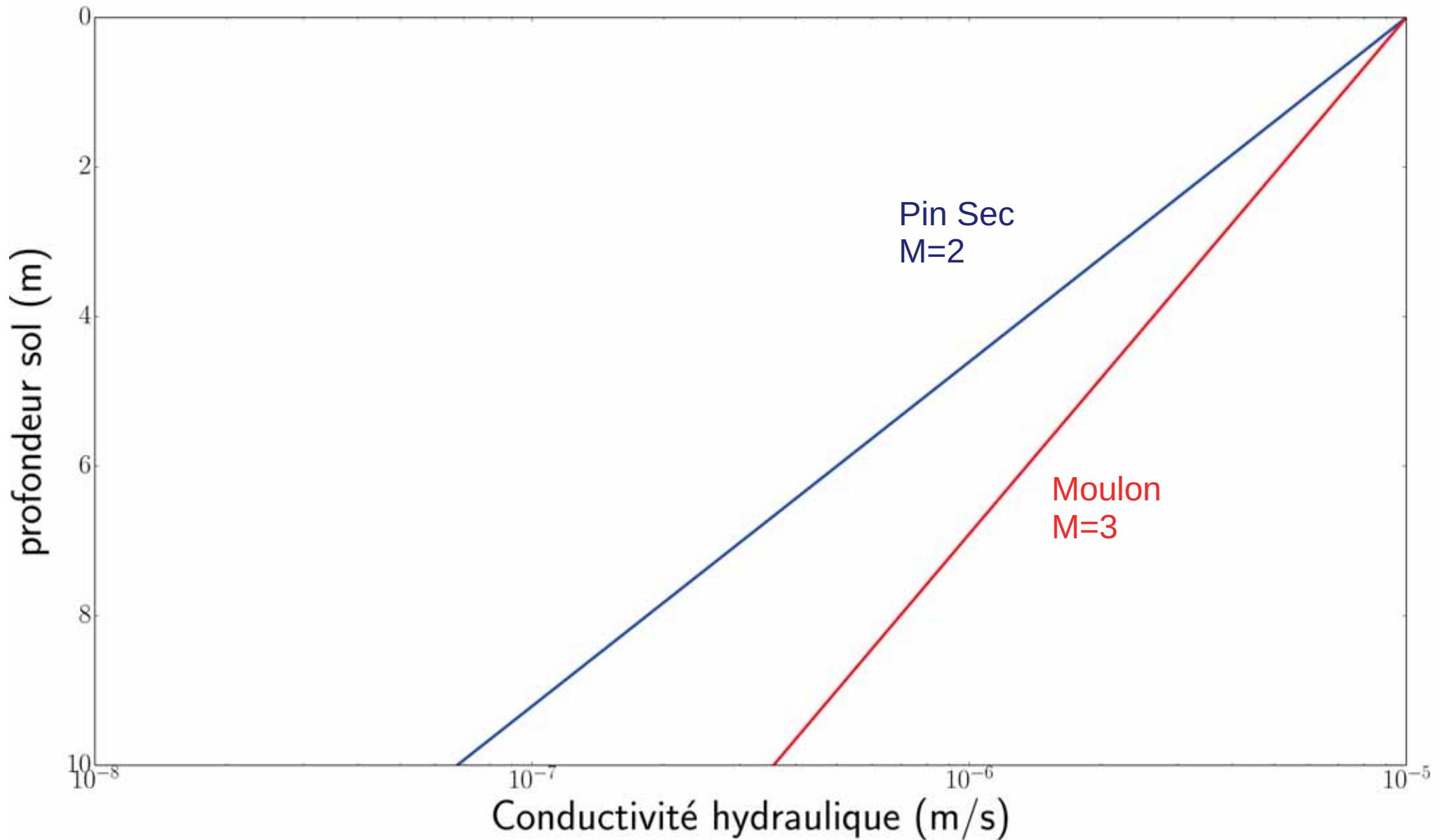
$$Q_{A \rightarrow B} = K_s^{nat} \cdot l_{interface} \cdot \nabla H \int_{z_{wet}}^{\infty} \exp(-z'/M) \cdot dz'$$

$$Q_{A \rightarrow B} = -K_s^{nat} \cdot l_{interface} \cdot \nabla H \cdot M [\exp(-z'/M)]_{z_{wet}}^{\infty}$$

$$Q_{A \rightarrow B} = K_s^{nat} \cdot \exp(-z'_wet/M) \cdot l_{interface} \cdot M \cdot \frac{H_A - H_B}{d_A + d_B}$$



## Information supplémentaire



# II. Phase 1 : Intégration du WTI et évaluation sur le Pin Sec

## II.2 Evaluation sur le Pin Sec – simulation de référence

**Cnash** "coefficient de Nash-Sutcliff"

erreur quadratique normalisée sur la variance

peut être décomposé à Cb et R<sup>2</sup>

inconvénient (Gupta,2009):

- i) pour des b.v. qui ont de grandes variabilités (de débit par exemple), l'impact du composant biais est réduit
- ii) en cherchant maximiser Cnash, on favorise les modèles (paramètres) qui sous-estiment les valeurs de pic et sur-estimes les valeurs de base

$$C_{nash} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (D_{sim}^t - D_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^n (D_{obs}^t - \bar{D}_{obs})^2}$$

**R<sup>2</sup>** "coefficient de détermination"

coefficient de corrélation au carré

mesure la dispersion normalisée conjointe de Dsim et Dobs

$$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^n (D_{sim}^t - \bar{D}_{sim})(D_{obs}^t - \bar{D}_{obs})]^2}{\sum_{t=1}^n (D_{sim}^t - \bar{D}_{sim})^2 \sum_{t=1}^n (D_{obs}^t - \bar{D}_{obs})^2}$$

**Cb** biais du modèle

le biais

$$C_b = \frac{\sum_{t=1}^n (D_{sim}^t - D_{obs}^t)}{\sum_{t=1}^n D_{obs}^t}$$

Meilleurs valeurs de WTI\_COEF pour les piezo

pz1: 250

pz2: 300

pz3: 0

pz4: 500

pz5:0

pz6: 30

pz7 : 30

pz8 : 0

# III. Phase 2 : Application sur Moulon

## II.2 Evaluation sur le Pin Sec – simulation de référence

pinsec\_baserun

moulon\_baserun

pinsec\_piezo\_calibré

moulon\_calibré

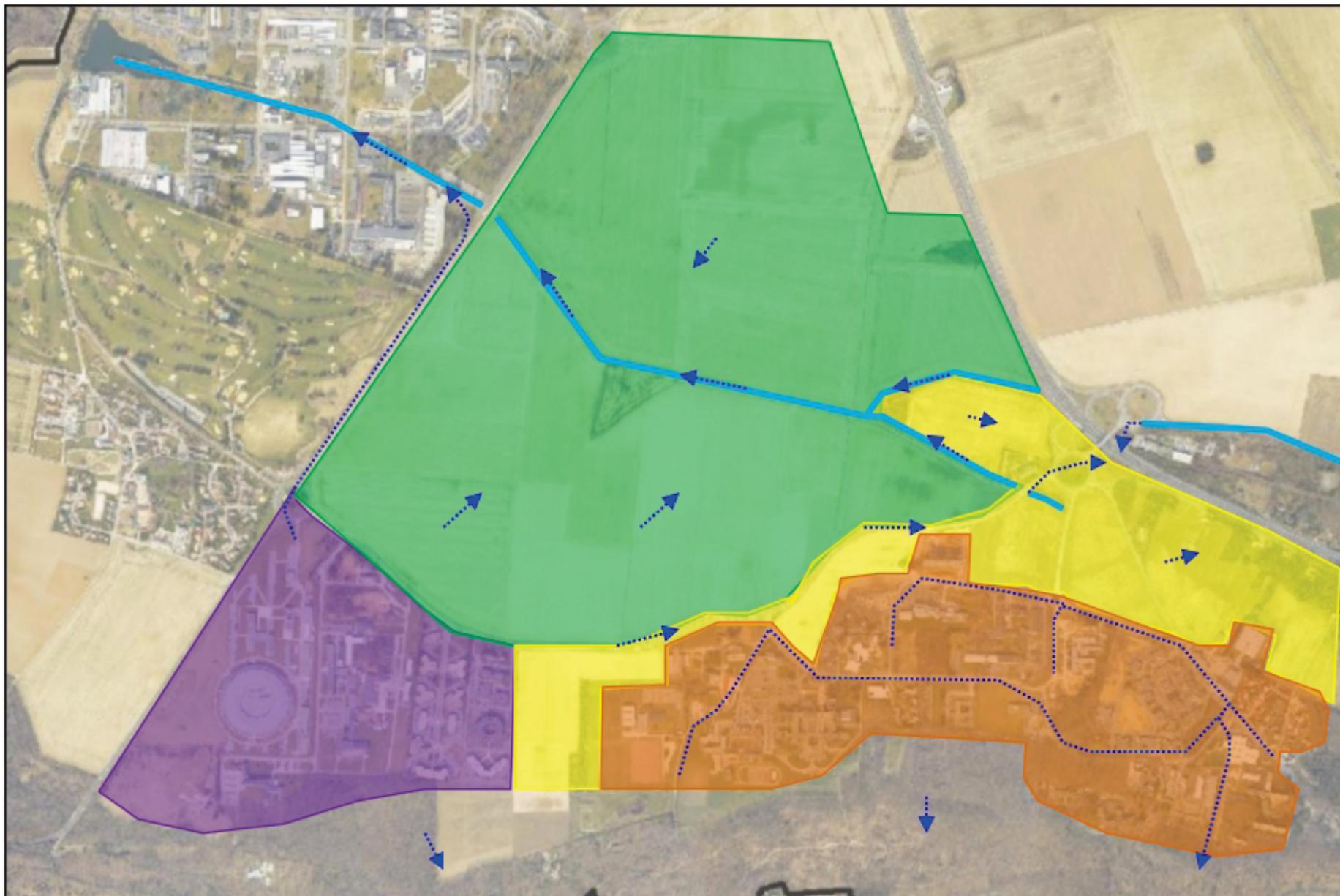
pinsec\_forçage

## III.1 Application de URBS-WTI au site

- Configuration géographique à l'état futur

	current (ha)	future (ha)	$\Delta$ (ha)	$\Delta(\%)$	connection coef.
$A^{nat}$	291 (86%)	223 (66%)	-68	-23	0.2
$A^{hou}$	20 (6%)	51 (15%)	31	155	1
$A^{str}$	27 (8%)	64 (19%)	37	135	1
$A^{imp}$	47 (14%)	115 (34%)	68	146	-
$A_{tree}^{nat}$	80 (24%)	11.1 (3%)	-69	-86	-
$A_{tree}^{str}$	2 (0.6%)	3.2 (1%)	1.2	60	-
$A_{tree}^{tot}$	82 (24.6%)	14.3 (4%)	-67.7	-83	-
					$A^{tot} = 338 \text{ ha}$

## III. Phase 2 : Application sur Moulon



## III.3 Modélisation pour l'état futur - démarche

**Préparation de données géographiques :**

- îlots et bâtiments : disponibles (EPPS)
- réseau d'EP : créé (stage Master de K. Farias)
  - référence : documents divers du projet (études de faisabilité, etc.)
  - hypothèses nécessaires (caractère géométrique)

2.1. SEQ.2: Les traverses TRA1, Jardins (JA2-3) et Places (PA4): *Le nouveau chemin du Moulon*

Un exemple de référence pour la création du réseau EP: rapport de l'étude de faisabilité du quartier Joliot-Curie

## III.2 Résultats obtenus et réalisme – étude de scénarios

## Type 1: imperméabilisation

Scénario	Description	Paramètres	Signification	Valeur
pav+50%	+ 50% de surfaces revêtues	$K_{sat}^{str}$	cond. hydraulique à saturation	$7.5 \times 10^{-8}$ m/s
			coef. connexion	1
pav+80%	+ 80% de surfaces revêtues		idem	
hou+50%	+ 50% de surfaces bâties	$K_{sat}^{hou}$	cond. hydraulique à saturation	0 m/s
			coef. connexion	1
hou-50%	- 50% de surfaces bâties		idem	

## III.2 Résultats obtenus et fiabilité – étude des scénarios

## Type 2: techniques alternatives

Scénario	Description	Param.	Signification	Valeur
flat roof 50% (regulated)	50% toitures terrasses stockantes (débit régulé)	$S_{max}^{f.r.}$	capacité de stockage	70 mm
flat roof 100% (regulated)	100% toitures terrasses stockantes (débit régulé)	$S_{drain}^{f.r.}$ $a^{f.r.}$	seuil drainage	1.5 mm
flat roof 100% - garden	100% toitures terrasses connexion au jardin	$S_{max}^{g.r.}$ $z_{g.r.}$	coef. loi d'orifice	$10-4 \text{ mm}^{0.5}/\text{s}$
green roof 50%	50% de toitures végétalisées	$z$	capacité de stock.	70 mm
green roof 100%	100% de toitures végétalisées	$S_{drain}^{g.r.}$ $a^{g.r.}$	épaisseur du substrat capacité stock. couche de drainage	0.15 m 40 mm
permeable pav	chaussées poreuses à structure réservoir	$K_{sat}^{p.p.}$ $S_{max}^{p.p.}$ $S_{min}^{p.p.}$ $K_{sat}^{voi}$	coef. loi d'orifice cond. hydraulique réservoir capa. de rétention seuil drainage	$10-4 \text{ mm}^{0.5}/\text{s}$ 0.7 m/s 160 mm 80 mm