



# Séminaire Technique

**Mise en perspective et débat :  
quelques outils et méthodes applicables pour l'estimation des  
volumes d'eau renouvelés en nappe d'Alsace.**

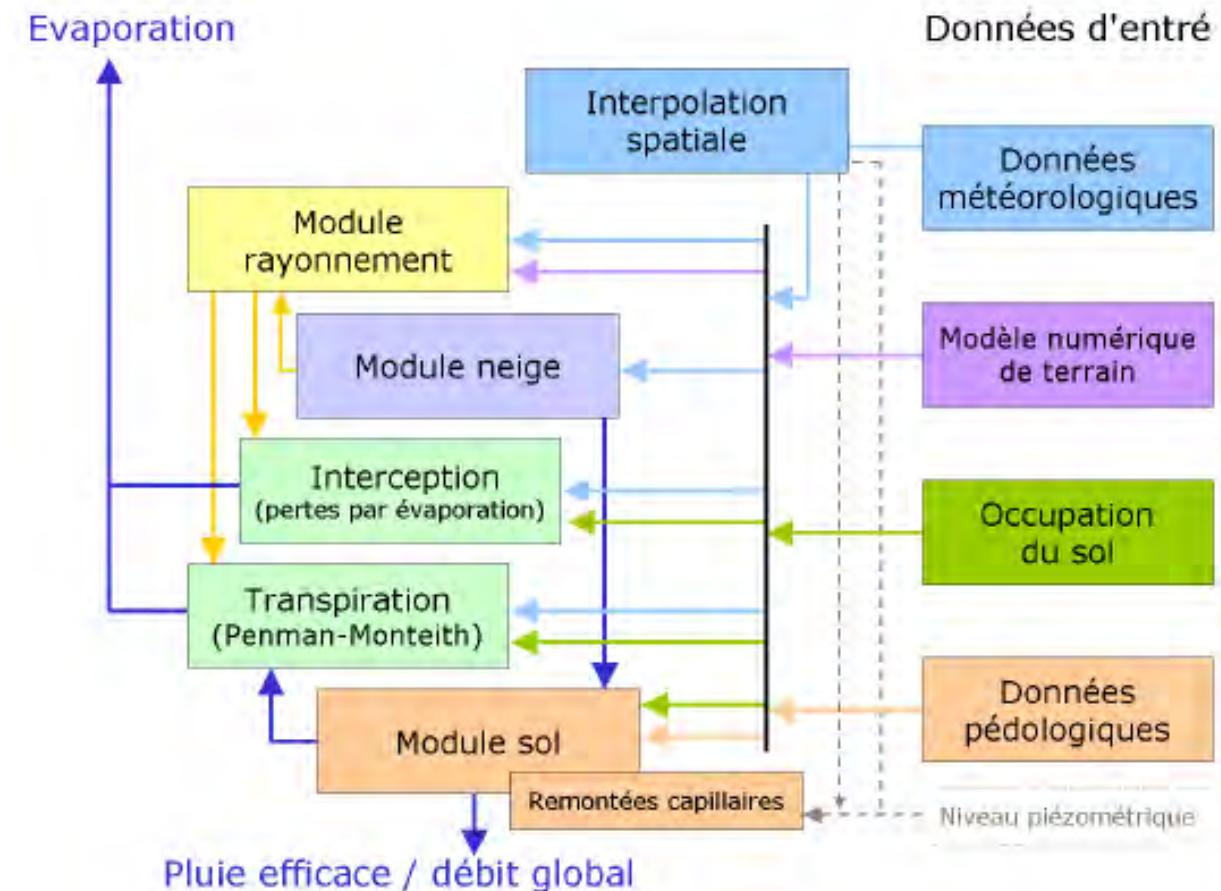
**Rémy Cotinet et Fabien Toulet**

**Strasbourg  
le 17 octobre 2023**

Mettre en perspectives les propos des présentations précédentes au regard des éléments déjà existant pour ouvrir la discussion autour du suivi de la recharge des nappes.

- Quelles méthodes sont pertinentes pour l'Aquifère Rhénan ? Comment améliorer les estimations pour l'Alsace = comment réduire les incertitudes de chaque terme du bilan hydrologique ?
- Comment faire le bilan saisonnier de la recharge et le rendre audible par le Grand Public ?
- Quelles prospectives ? Sera-t-on capable de prévoir la recharge 1 an avant ?
- Y aura-t-il assez d'eau pour les éléphants ?

GWN : Modèle déterministe spatialisé qui calcule l'Etr, le bilan hydrique du sol et l'infiltration sous la zone racinaires au pas de temps de journalier.



Pour les terrains situés en zone de piémonts (BW et autres landes)

Les pluies efficaces sont corrigées par un ratio moyen des rapports débits de base /Pluies efficaces totales.

## Conclusions et perspectives d'après le manuel d'utilisation V3 2012

Modèle prometteur, mais difficile à renseigner en pratique. Notamment, pour les remontées capillaires et le ratio ruissellement/infiltration.

Le modèle a tendance à surestimer la recharge pour certains sols.

Validation des infiltrations en sortie a été effectuée avec des lysimètres pour une gamme de valeur de Réserve Utiles.

### Pistes d'amélioration :

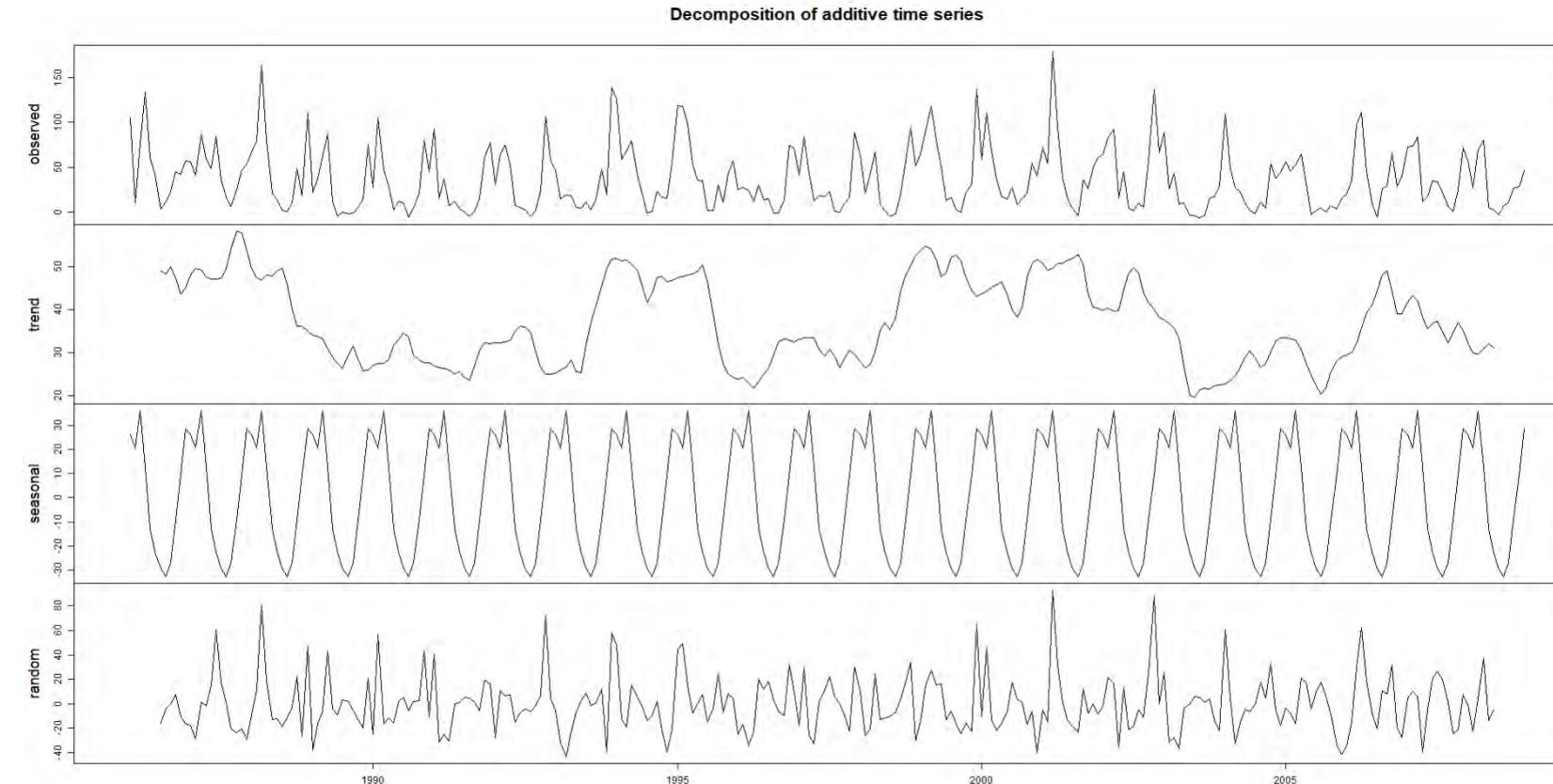
- Tenir compte de la porosité des sols.
- Implémenter plus largement le ruissellement estimé par la méthode du Curve Number

# Recharge simulée par GWN 1987 - 2008

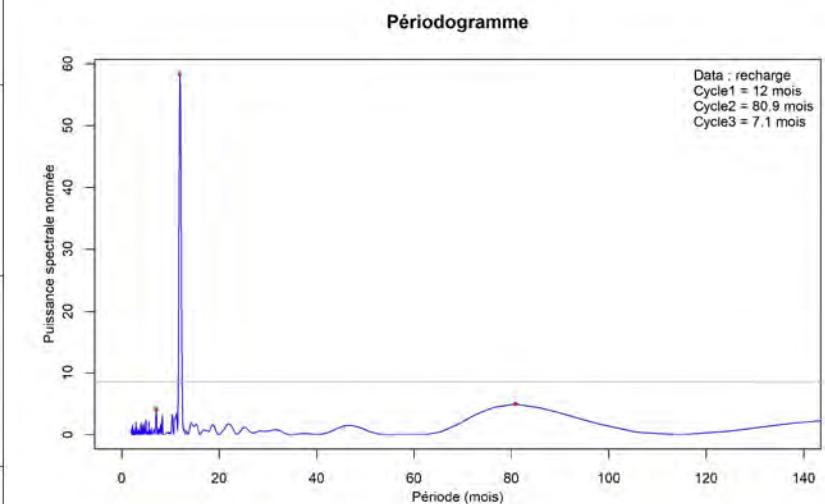
## Décomposition du signal de la recharge moyenne de l'aquifère rhénan

Résumé : 448 +/- 126 mm/an (1987 – 2008)

Saisonnalité annuelle, cyclicité pluriannuelle apparente 7 ans, avec une petite saison de recharge au début du printemps.

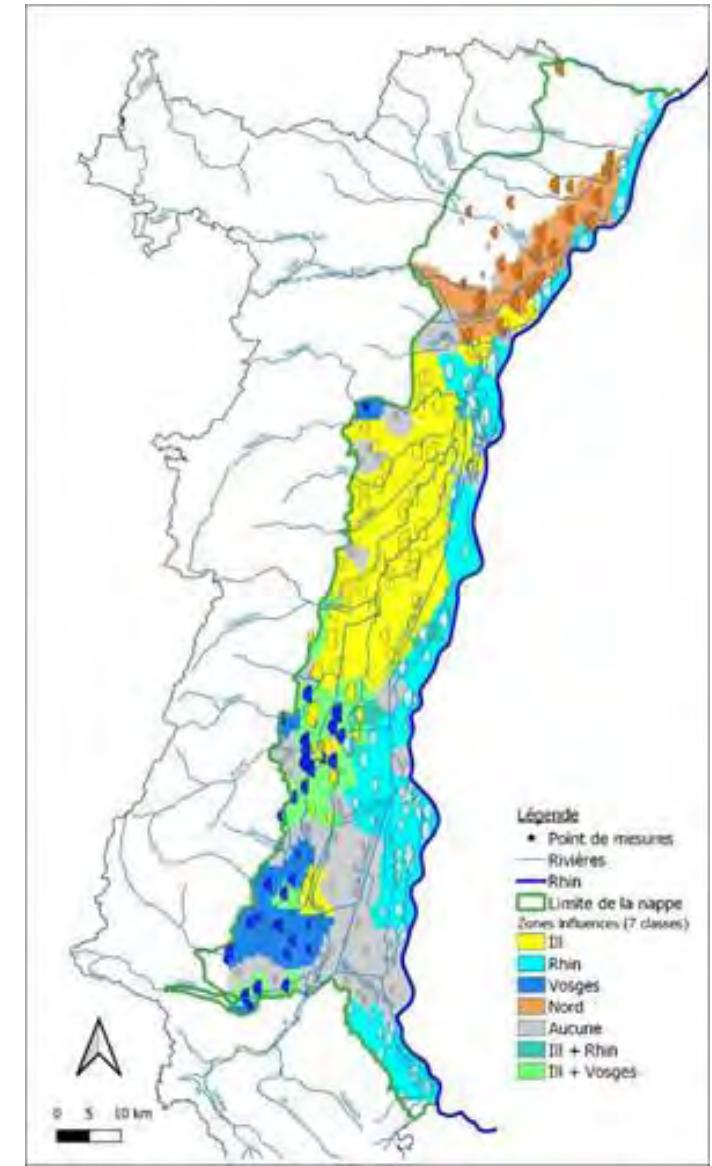
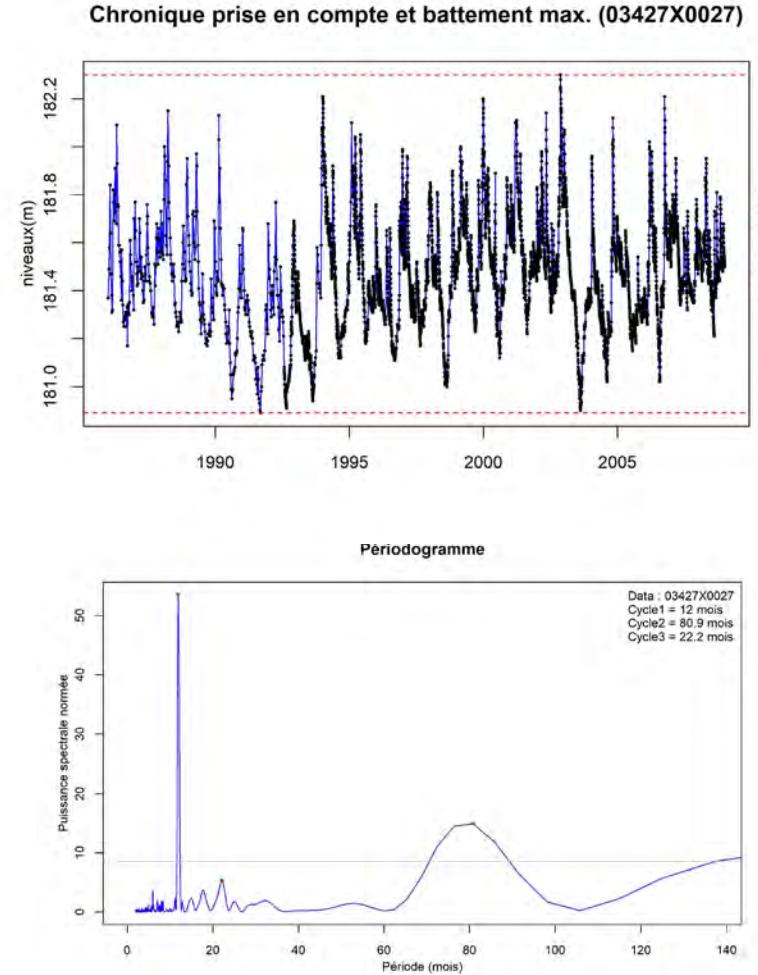
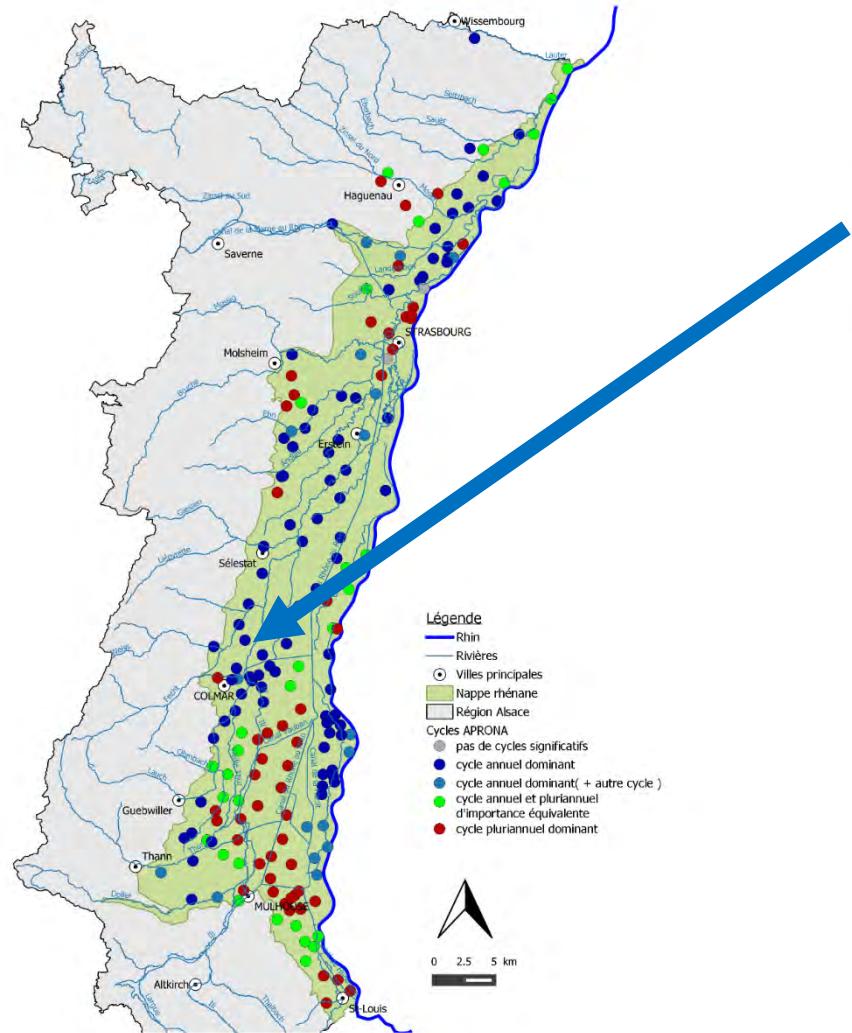


## Décomposition de la recharge moyenne



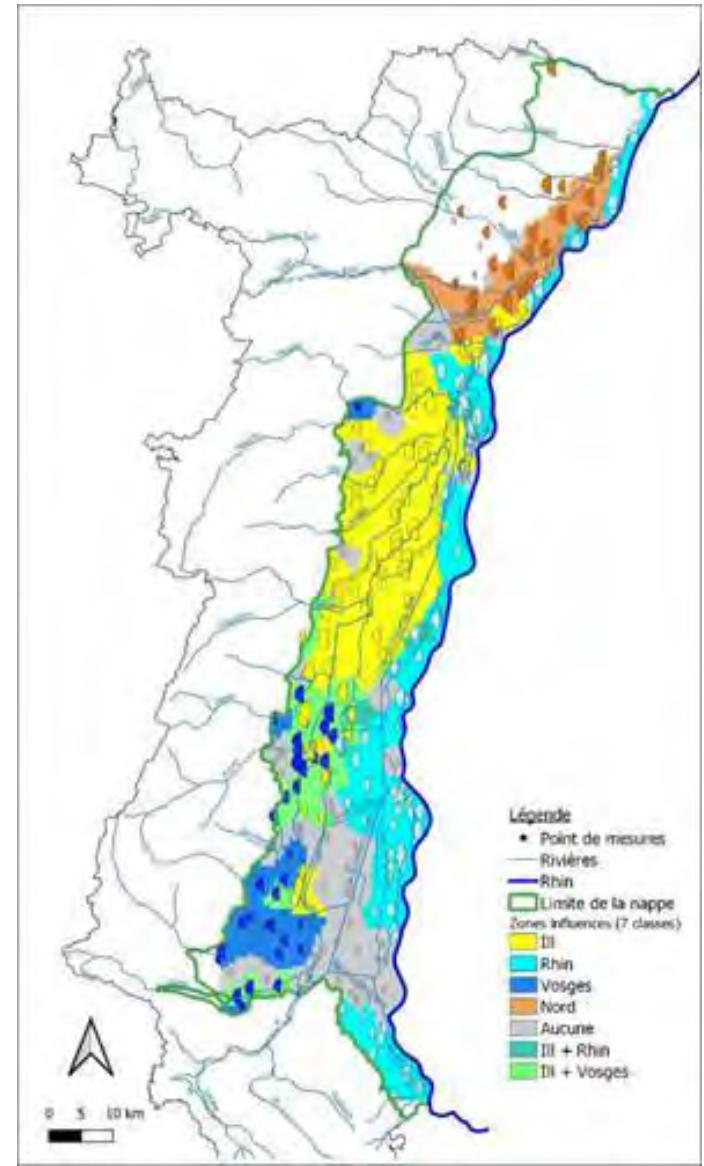
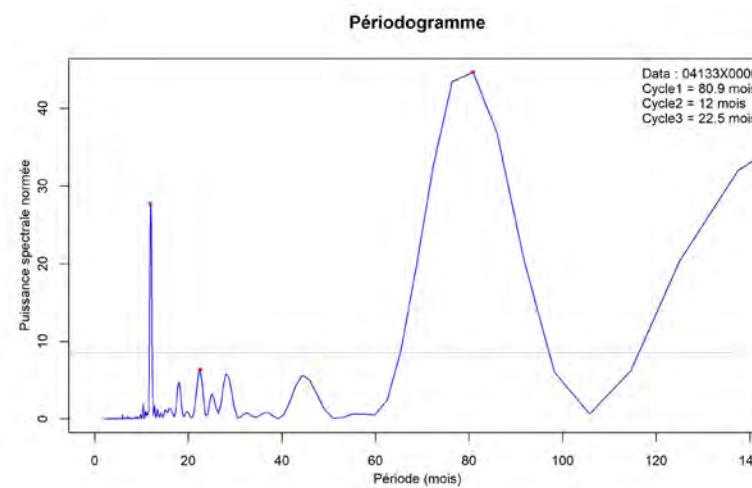
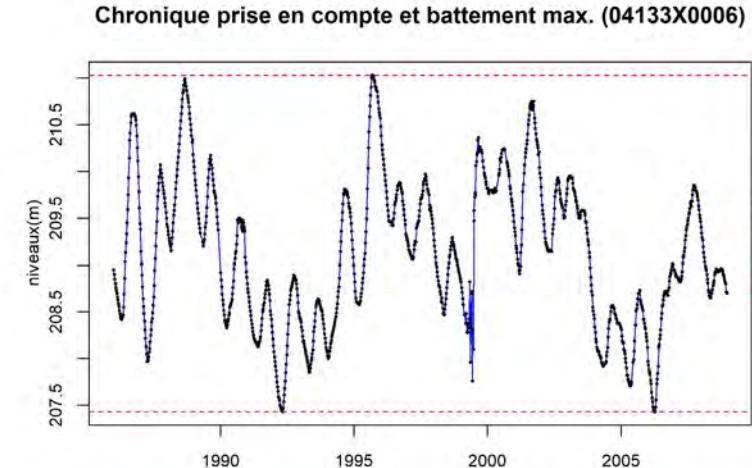
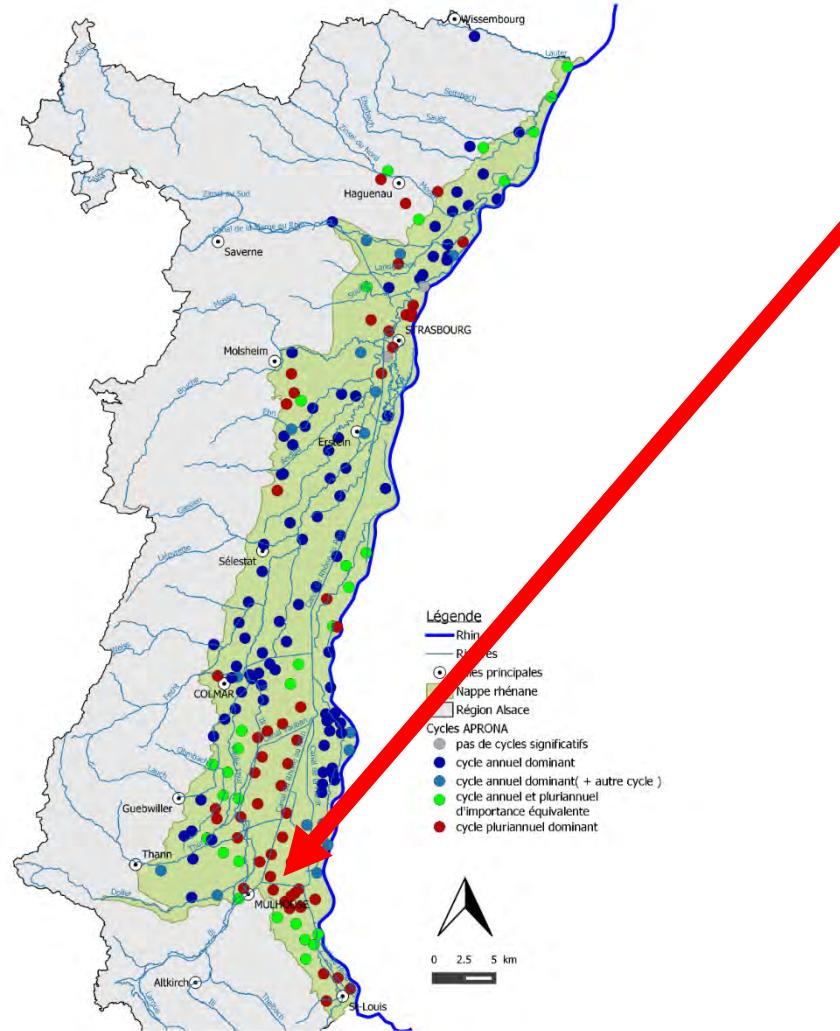
# Recharge simulée par GWN 1987 - 2008

## Décomposition du signal piézométrique



# Recharge simulée par GWN 1987 - 2008

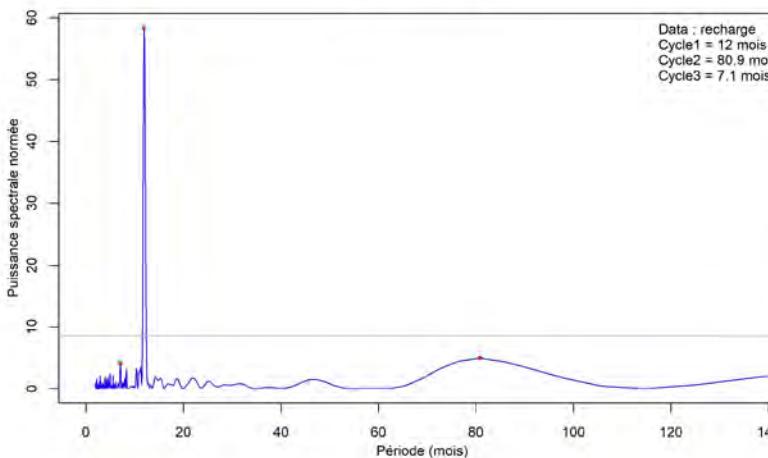
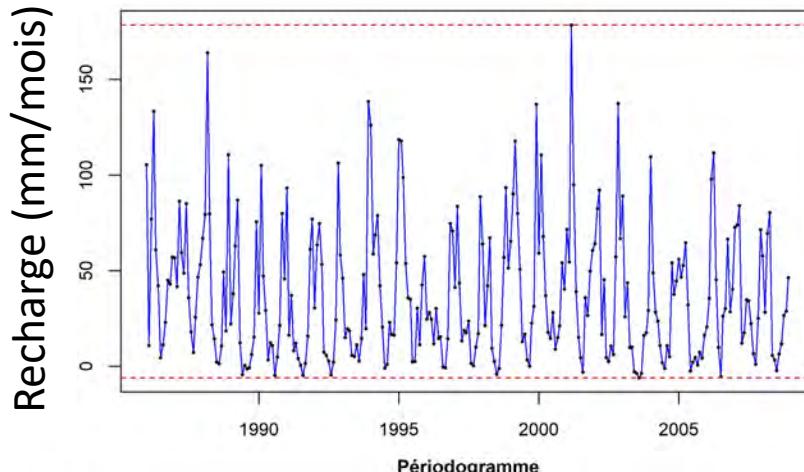
## Décomposition du signal piézométrique



# Recharge simulée par GWN 1987 - 2008

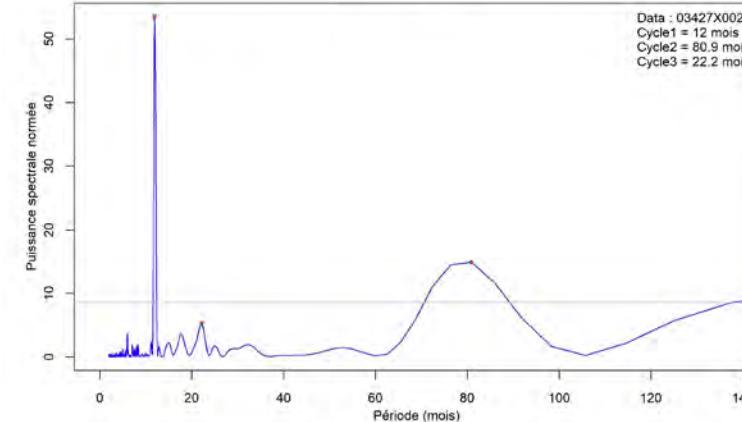
## Décomposition du signal piézométrique

### Recharge

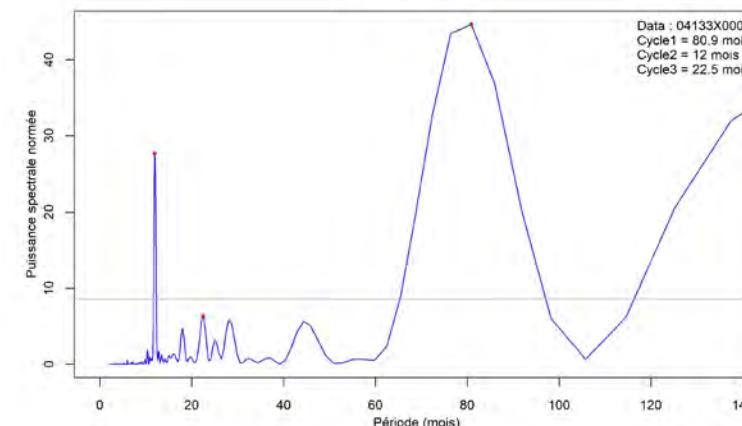


### Piezometry with dominant seasonal cycle

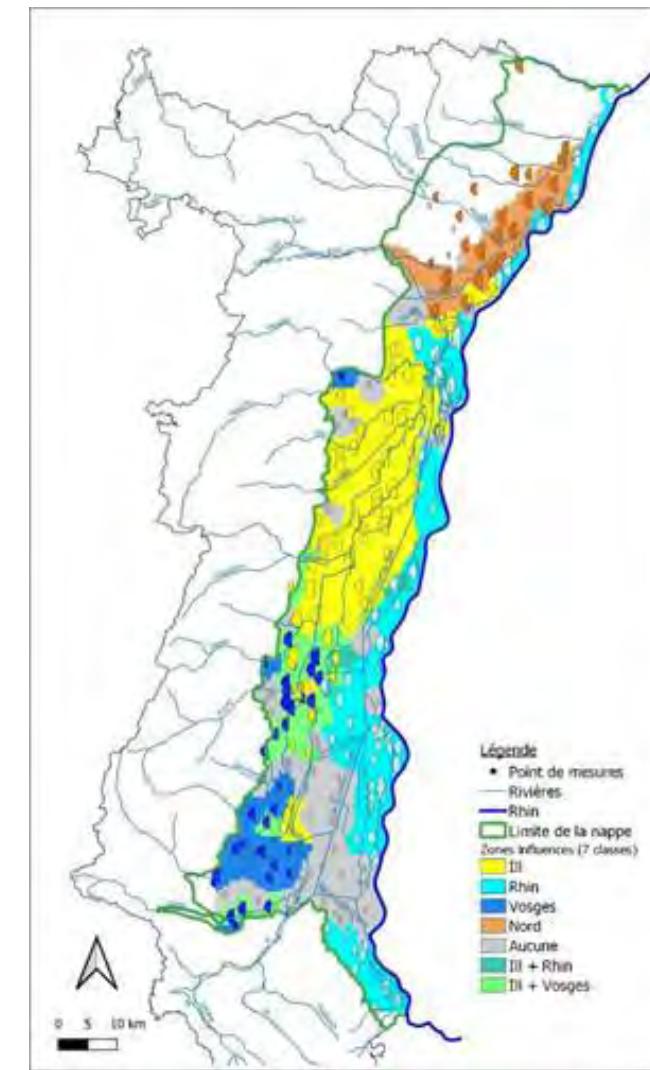
#### Périodogramme



#### Périodogramme



### Piezometry with dominant pluriannual cycle



# Méthode d'estimation de la recharge alternative

## Modélisation 1D de la ZNS + Analyse des fluctuations piézométriques

Résumé de l'article : Gumuła-Kawęcka, A., Jaworska-Szulc, B., Szymkiewicz, A., Gorczewska-Langner, W., Pruszkowska-Caceres, M., Angulo-Jaramillo, R., Šimůnek, J., 2022. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *J. Hydrol.* 605, 127283.

### Ecoulement non-saturé en 1D (avec HYDRUS-1D)

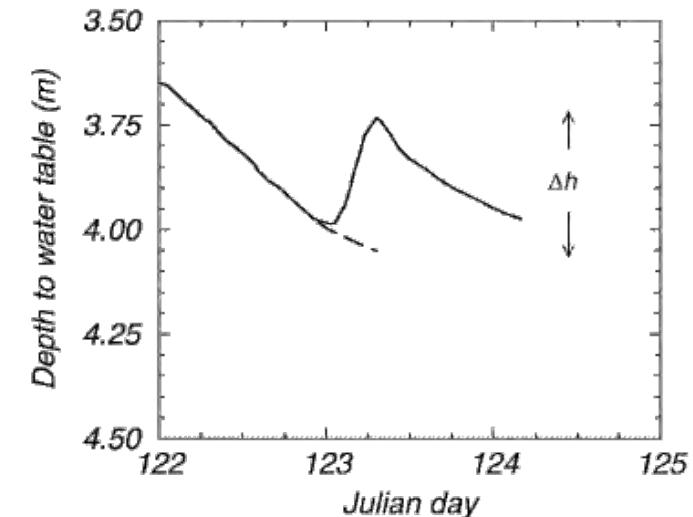
Résolution numérique de l'équation de Richards :

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

Avec  $\theta$  l'humidité volumique relative,  $K(h)$  perméabilité dépendante de la charge hydraulique  $h$  (négative en condition non saturée), la position  $z$ , le temps  $t$  et  $S(h)$  le stock disponible accessible par les racines.

*Nécessite des enregistrements d'humidité du sol et des hypothèses sur les propriétés hydrodynamiques du sous-sol (mesures, estimations par des fonctions empirique ou sur la base de la littérature)*

### Méthode WFT



**Fig. 1** Hypothetical water-level rise in well in response to rainfall.  $\Delta h$  is equal to the difference between the peak of the rise and low point of the extrapolated antecedent recession curve (dashed line) at the time of the peak

Healy, R.W. and Cook, P.G. (2002)

## Limites et améliorations d'analyses des fluctuations piézométriques

*Conditions d'application – hypothèses et concepts des Méthodes d'analyse des fluctuations piézométriques (en anglais WFT Water Table Fluctuation)*

### Cadre idéal d'application

- Nappe libre, peu profonde (pour que la réponse piézométrique puisse ne pas être dissipée/atténuée sur l'épaisseur);
- Chronique représentative d'une zone de comportement « homogène », à court pas de temps ;
- Recharge variable dans le temps ;
- Rendement spécifique (= porosité efficace en nappe libre) connu ou estimé.

Principe : l'augmentation de la piézométrie est due à une entrée d'eau qui correspond à la recharge

$$R = \frac{dh}{dt} \times S_y$$

*La Recharge R, le rendement spécifique Sy, la hauteur du niveau de la nappe h et le temps t.*

Hypothèses : aucune évaporation de la nappe n'a lieu lors de la recharge, les termes pompages et les flux latéraux sont considérés égal à zéro.

Avantage : méthode simple qui permet de tenir compte de la variabilité des temps de transfert des écoulements à travers la ZNS.

# Méthode d'estimation de la recharge alternative

## Limites et améliorations d'analyses des fluctuations piézométriques

*Conditions d'application – hypothèses et concepts des Méthodes d'analyse des fluctuations piézométriques – WFT Water Table Fluctuation*

**Pour corriger des flux latéraux,**

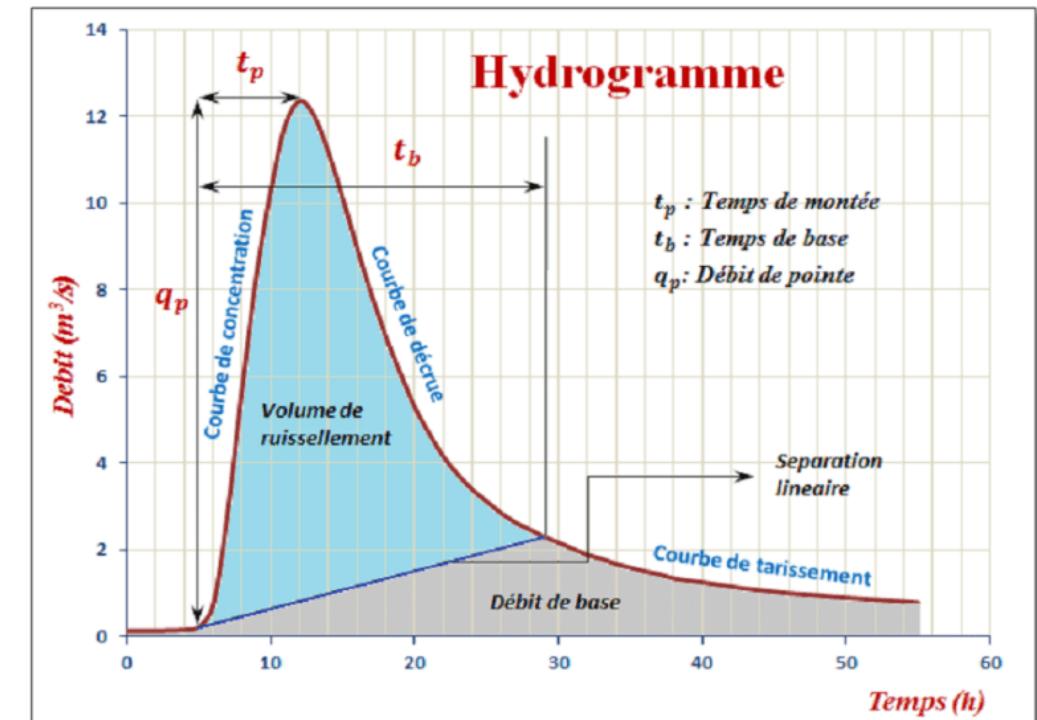
Calculer via des fonctions simulant des drains dans HYDRUS-1D  
ou

Utiliser (BaseFlow) le débit de base issu de la décomposition des hydrogrammes de crue.

**Pour Estimer le Rendement spécifique**, cela peut se faire par :

1. relation empirique par exemple  $Sy = 0,117 \sqrt{K_s}$  avec  $K_s$  la perméabilité à saturation selon Pazdro and Kozerski (1990)

2. modélisation en comparant les volumes d'eau arrivant dans la nappe (sortie des couches non saturées) et celle de la nappe simulée)



Gumuła-Kawęcka et al. (2022)

# Méthode d'estimation de la recharge alternative

## Modélisation des écoulements en Non-Saturé avec HYDRUS 1D

### 1<sup>ère</sup> série de simulations

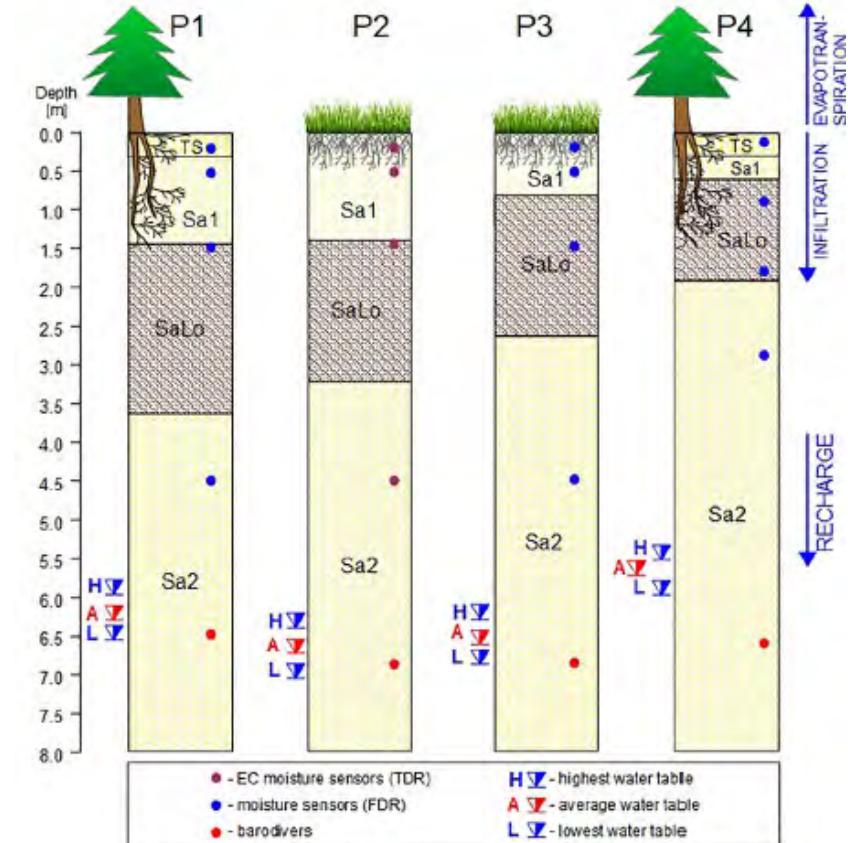
Optimisation des paramètres hydrodynamiques (par inversion) sous hypothèses du comportement des couverts végétaux relativement simples :

- Evapotranspiration Penman-Monteith,
- Interception, indice foliaire (LAI - Leaf Area Index) et distribution des racines par formulations empiriques,
- Et le niveau moyen de la nappe.

### 2<sup>ème</sup> série de simulations pour valider les estimations précédentes

et pour reproduire les fluctuations de la nappe en :

- étendant le modèle aux premiers mètres de la Zone Saturée
- Et en ajoutant un flux latéral de type drain (représentant un lac) type équation de Hooghoudt.



# Méthode d'estimation de la recharge alternative

## Analyses des fluctuations piézométriques

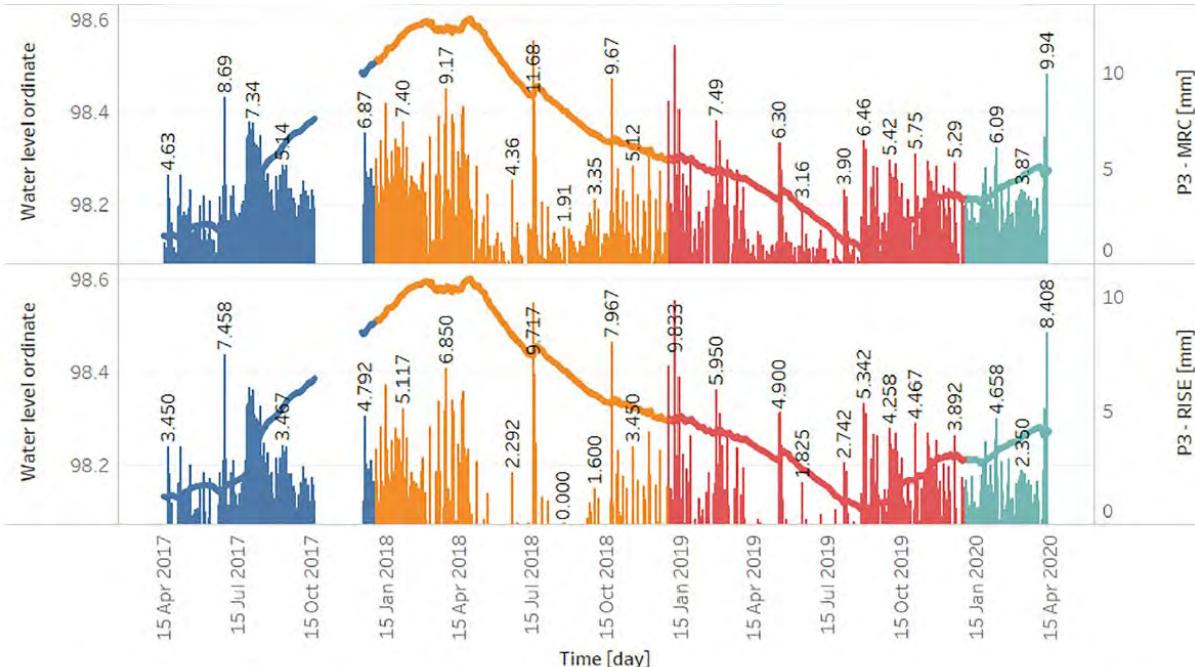
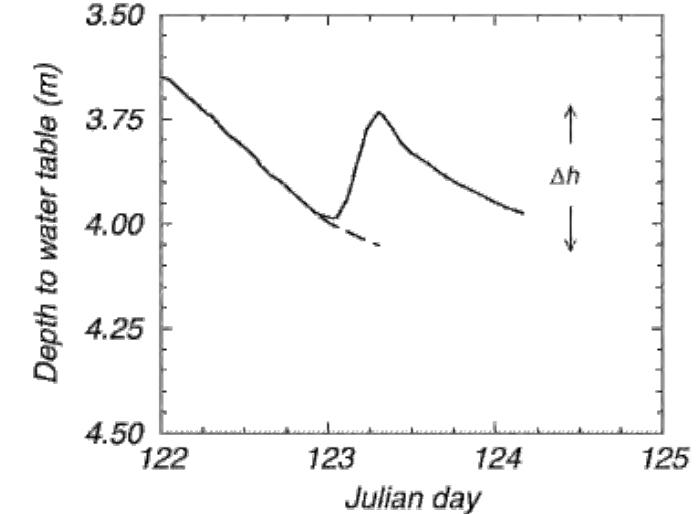


Fig. 12. Increments of groundwater table caused by recharge in profile P3, according to the RISE and MRC methods.

Gumuła-Kawęcka et al. (2022)

*La méthode WFT est appliquée en simulant différents Sy (issus des simulations numériques) avec deux approches pour déterminer les  $\Delta h$  : WFT MRC (Master Recession Curve) et WFT RISE.*



**Fig. 1** Hypothetical water-level rise in well in response to rainfall.  $\Delta h$  is equal to the difference between the peak of the rise and low point of the extrapolated antecedent recession curve (dashed line) at the time of the peak

Healy, R.W. and Cook, P.G. (2002)

# Méthode d'estimation de la recharge alternative

Modèle couplé écoulement non saturé et analyse de la fluctuation piézométrique

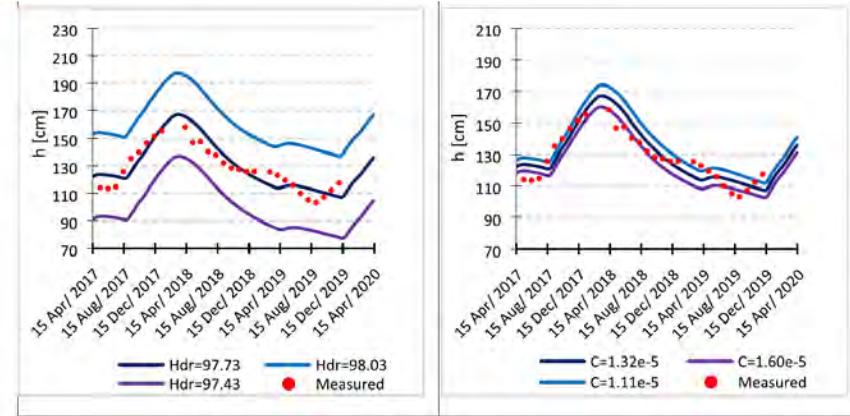


Fig. 10. Sensitivity of the water table position in profile P1 ( $h$ , measured with respect to the profile bottom) to the parameters of lateral outflow boundary condition:  $H_{dr}$  [m asl] (left) and  $C$  [ $(\text{cm} \cdot \text{d})^{-1}$ ] (right).

## Conclusions de cet article :

Les observations d'humidité de sol ne suffisent pas à bien connaître les propriétés du couvert végétal et des paramètres hydrodynamiques.

Le couplage de ces observations avec la fluctuation de la nappe permet de bien représenter les écoulements non saturés et rend fiable l'utilisation des analyses des fluctuations de la nappe.

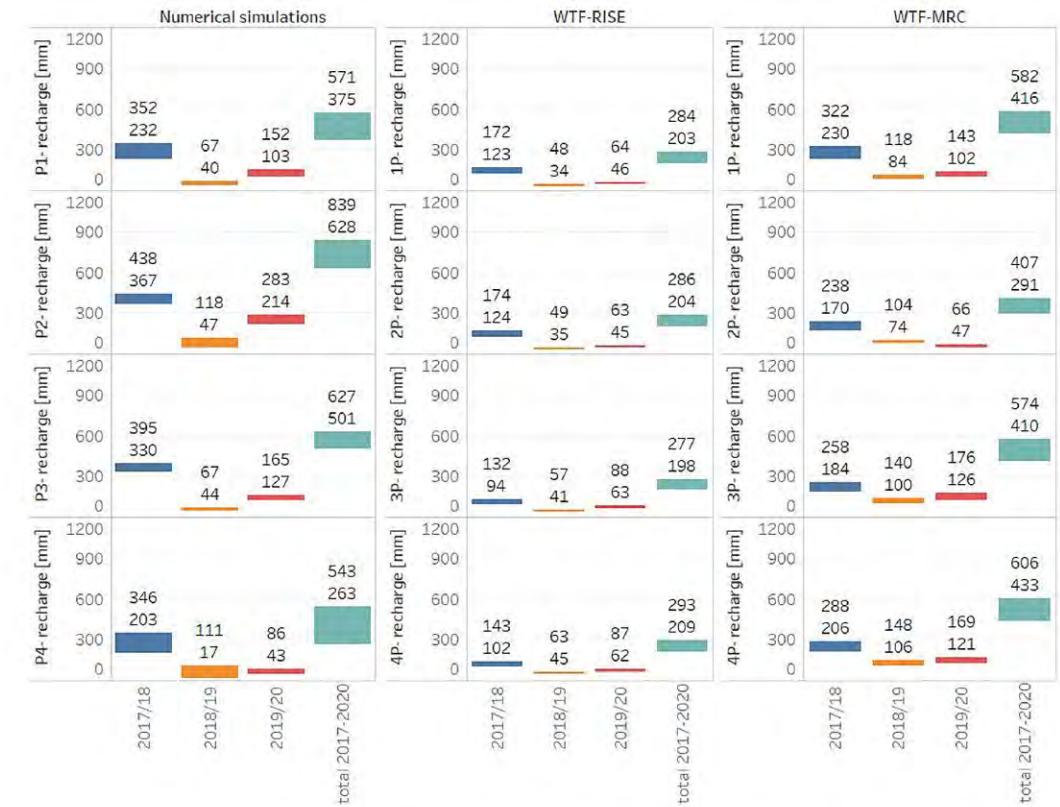


Fig. 6. Recharge estimates obtained using different methods. For numerical simulations, the range of results corresponds to the assumed range of LAI values in each profile. For WTF, the range of results corresponds to the assumed range of specific yield values in the aquifer.



*Merci pour votre attention*

*à vous de conclure !*

Mettre en perspectives les propos des présentations précédentes au regard des éléments déjà existant pour ouvrir la discussion autour du suivi de la recharge des nappes.

- Quelles méthodes sont pertinentes pour l'Aquifère Rhénan ? Comment améliorer les estimations pour l'Alsace = comment réduire les incertitudes de chaque terme du bilan hydrologique ?
- Comment faire le bilan saisonnier de la recharge et le rendre audible par le Grand Public ?
- Quelles prospectives ? Sera-t-on capable de prévoir la recharge 1 an avant ?
- Y aura-t-il assez d'eau pour les éléphants ?

