

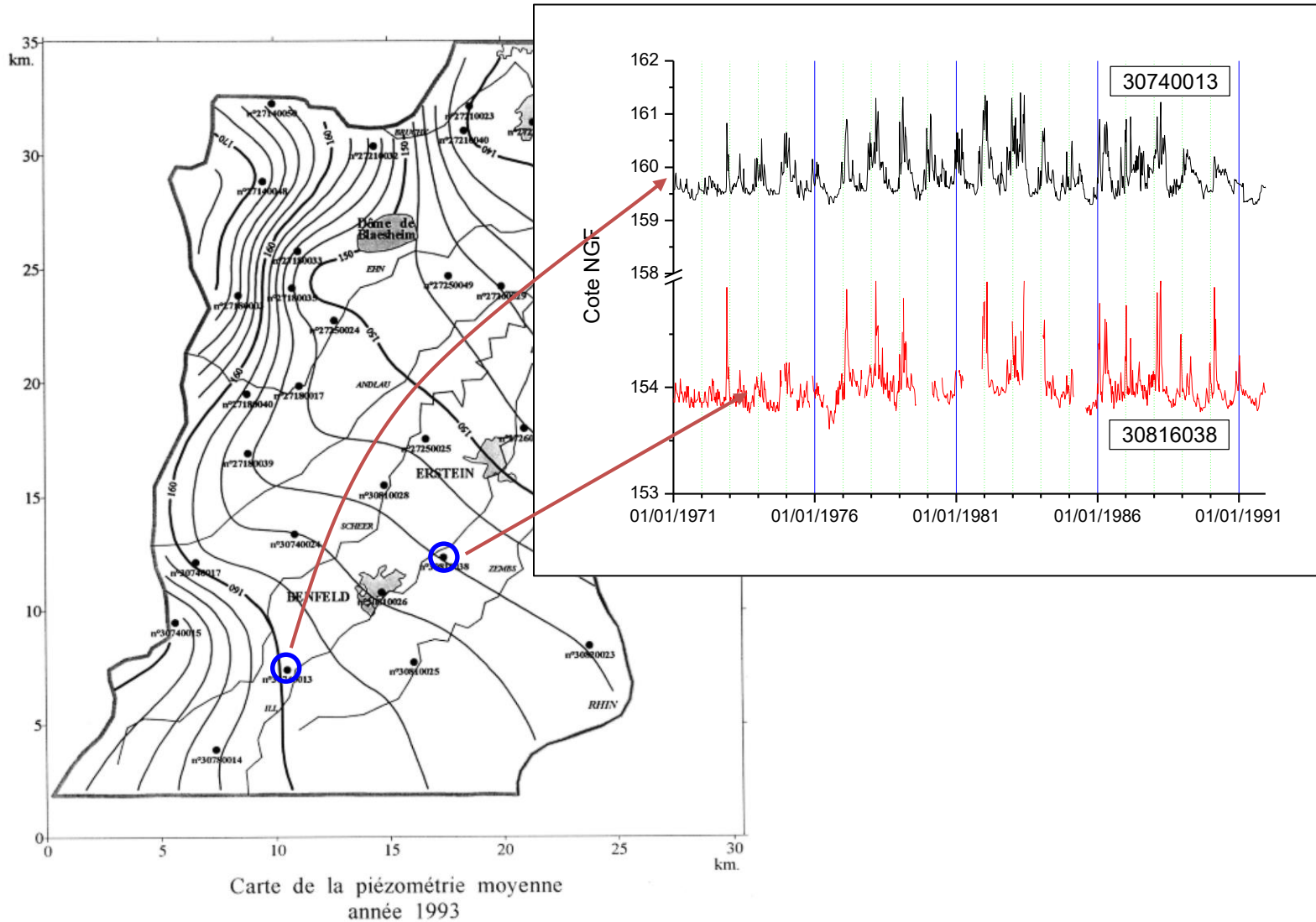
Séminaire technique de l'Observatoire de l'eau d'Alsace

## Méthodes d'évaluation de la recharge applicables en nappe d'Alsace.

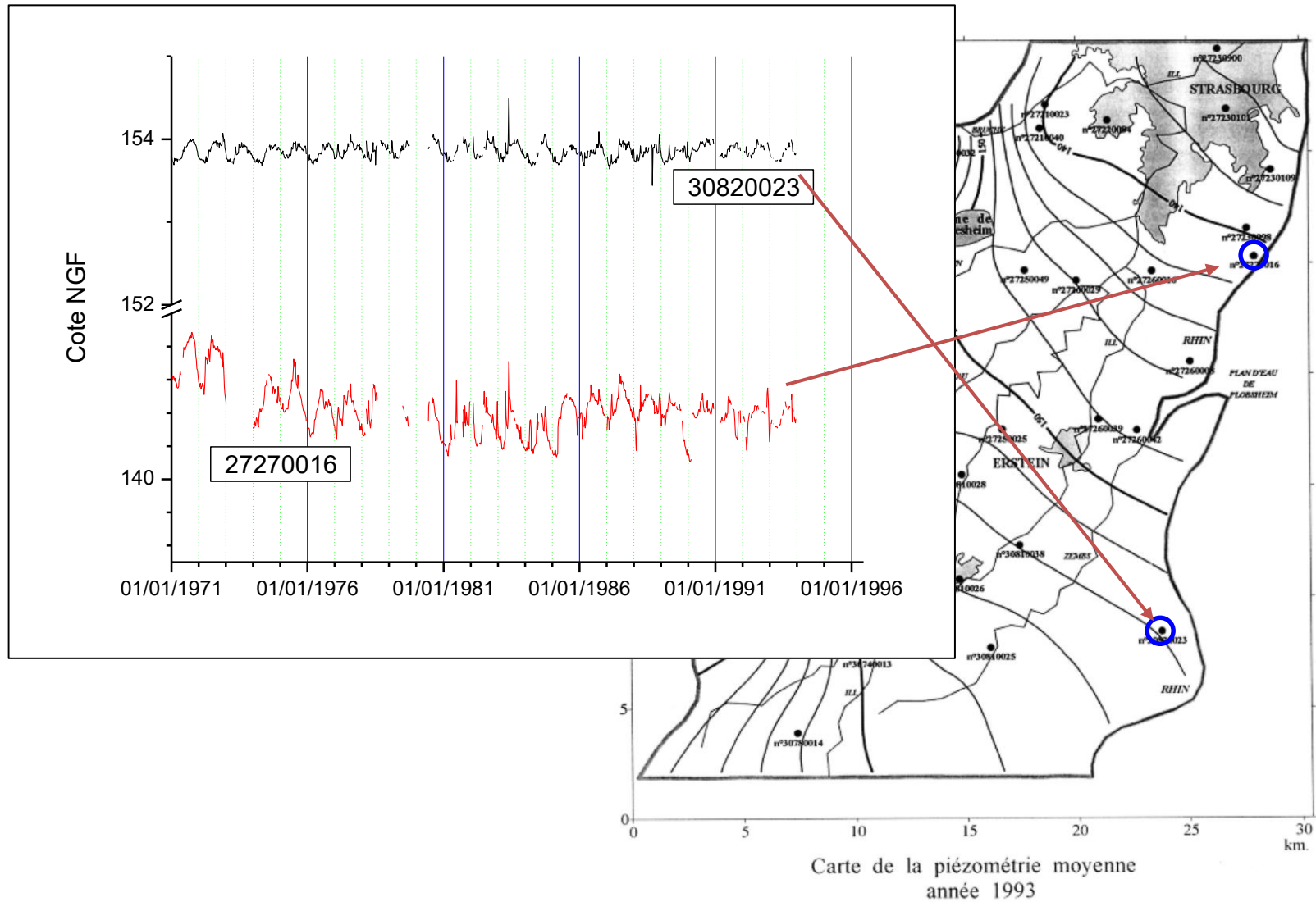
Evaluation de la recharge des réserves en eau  
souterraine par bilans d'énergie et bilans hydriques.

P. Ackerer, Belfort B., Luttenauer D., Weill S.  
Institut Terre Environnement de Strasbourg  
CNRS, ENGEES, Univ. Strasbourg

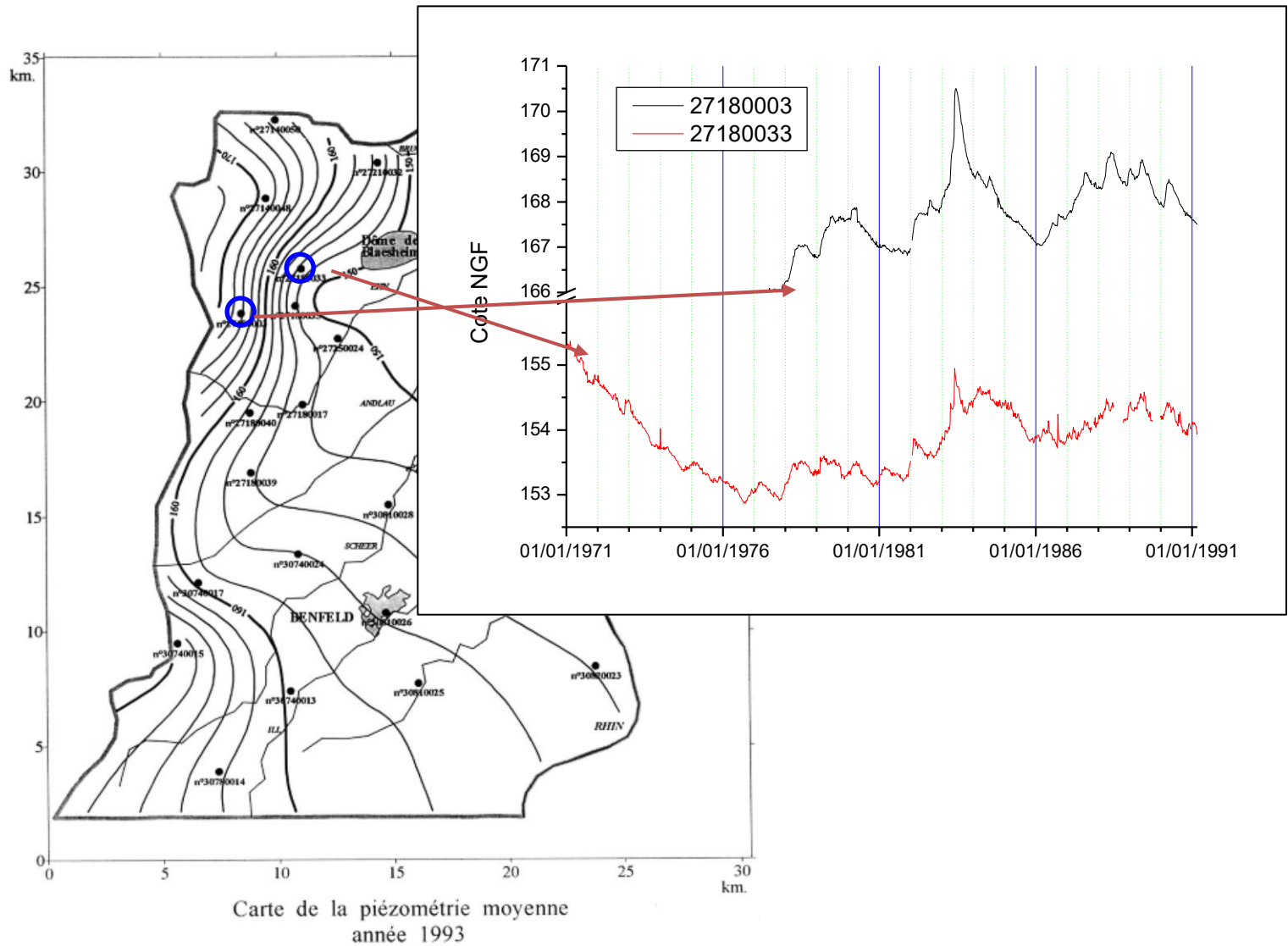
# La piézométrie de la nappe d'Alsace



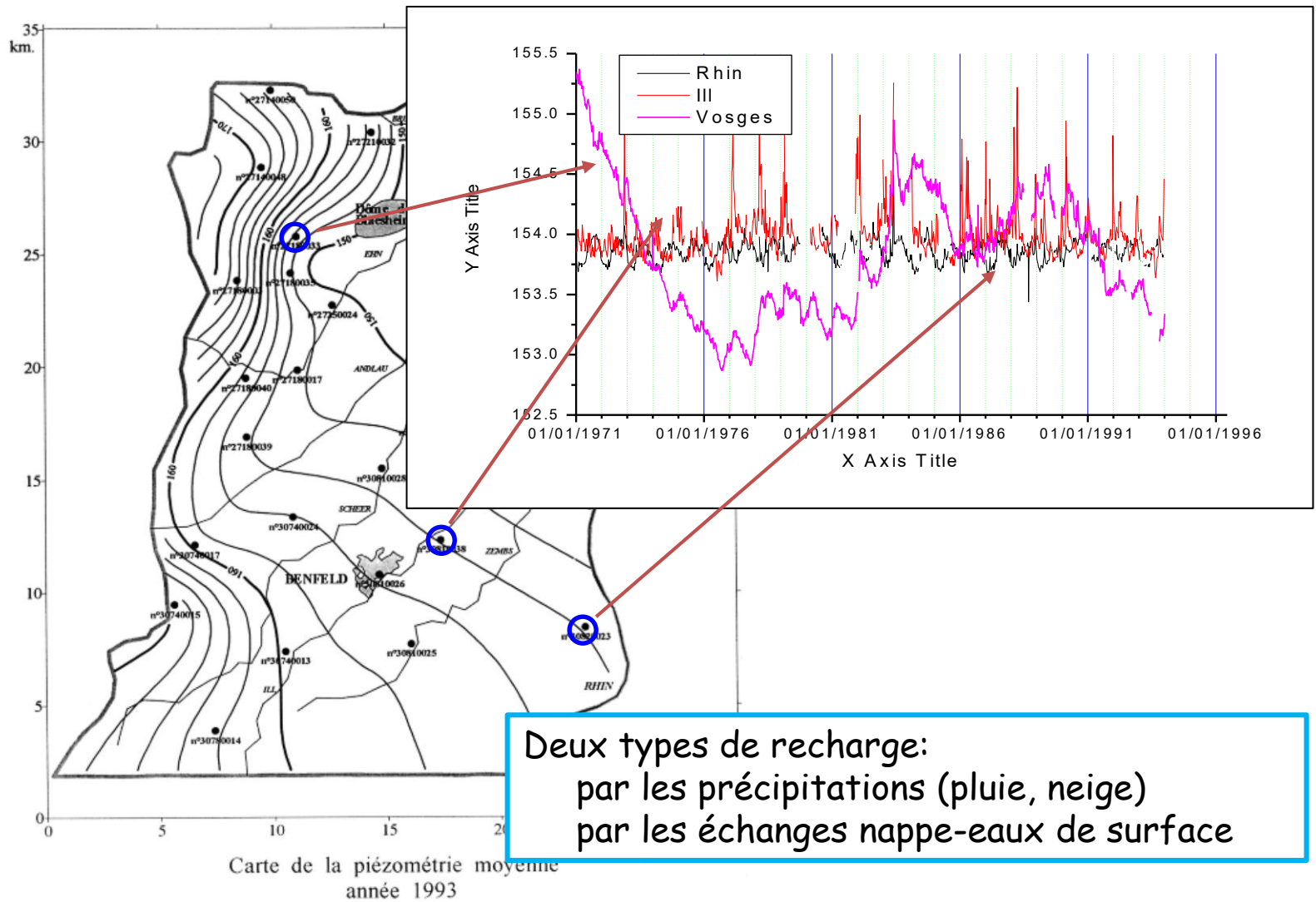
# La piézométrie de la nappe d'Alsace



# La piézométrie de la nappe d'Alsace



# La piézométrie de la nappe d'Alsace



# Estimation de la recharge de nappe

- Approche empirique: une fonction de la pluie.
- Approche basée sur la fluctuation des niveaux de nappe.
- Approche conceptuelle du bilan hydrique :

$$R=P-ET-\Delta S$$

R : recharge

P: précipitation

ET: Evaporation et Transpiration

$\Delta S$ : variation de stock entre la surface du sol et la surface de la nappe.

- Calcul du bilan d'énergie et du bilan hydrique.

## Estimation de la recharge de nappe

Méthode développée à ITES est fondée sur des bilans d'énergie et d'eau.

Pourquoi un nouveau modèle.

(Land Surface Model - SurFex, SWAT, CLM, EcH2O, LPJ,...)

NIHM-MLSM

Mise à jour des hypothèses de conception des modèles précédents

Modulaire dans le choix des concepts (fonte de neige par exemple)

Adapté à la propagation d'incertitudes.

Maîtrise du code pour le couplage à NIHM

NIHM-MLSM : Comment ça marche ?

Bilan en énergie

Bilan en eau

# Bilan d'énergie à la surface

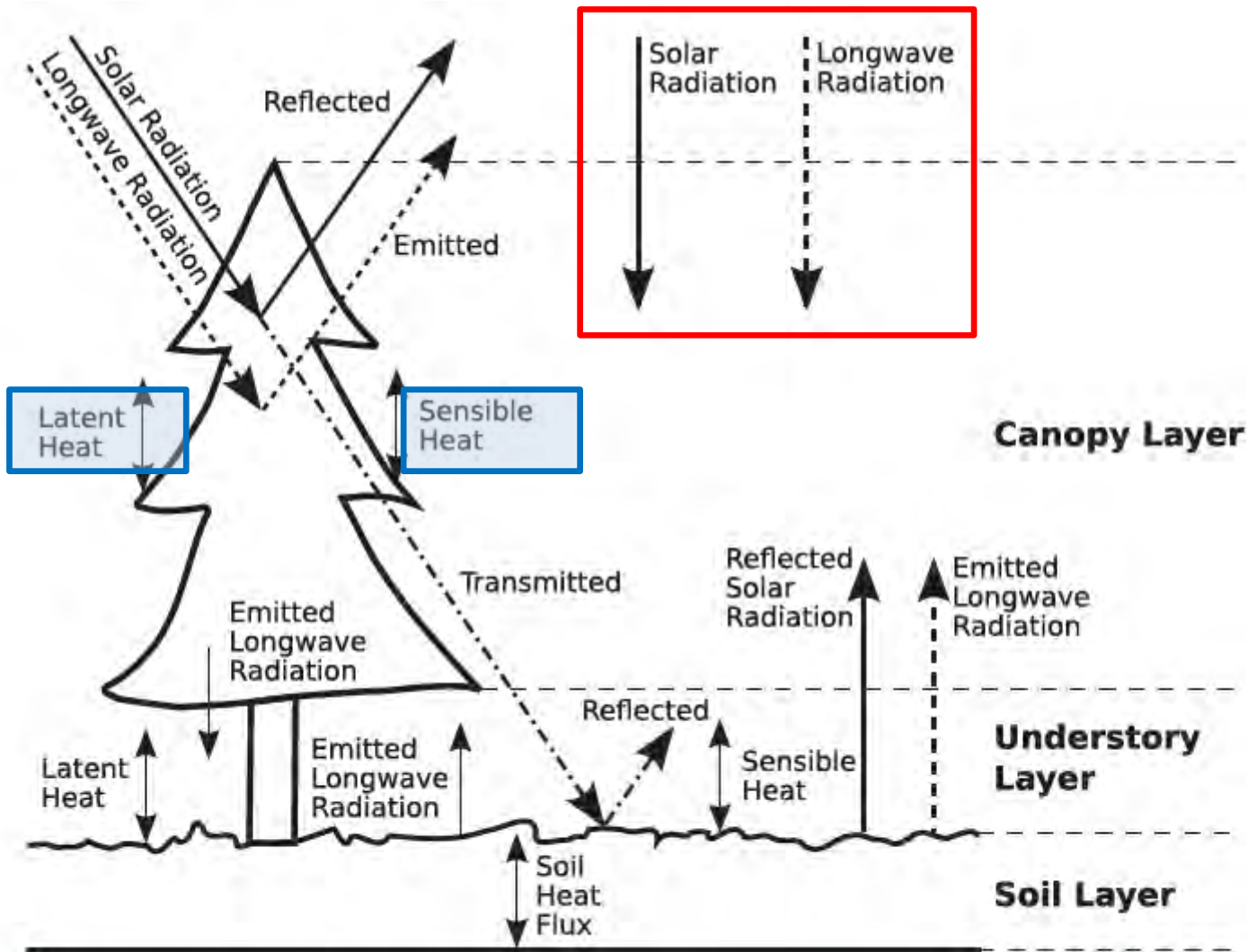


Figure 1. Schematic of the main simulated components of the energy balance.

(Maneta, Silverman, 2013)



## Bilan d'énergie à la surface



$$R_n = \rho_w \lambda E_s + G + H$$

$R_n$  : Rayonnement net

$$R_n = (1 - \alpha_s) R_{s\downarrow}^A + \sigma \varepsilon_s (\varepsilon_a T_A^4 - T_s^4)$$

$R_s$  : Rayonnement solaire incident

$\alpha_s$  : Albedo du sol.

$\sigma$  : Constante de Boltzmann.

$\varepsilon_a$  : Emissivité de l'atmosphère.

$\varepsilon_s$  : Emissivité du sol.

$T_a$  : Température de l'atmosphère.

$T_s$  : Température à la surface  
(feuille, sol, ...).

## Bilan d'énergie à la surface



$$R_n = \rho_w \lambda E_s + G + H$$

$G$ : Echange de chaleur avec le sol

$$G = \frac{\rho_a c_p}{r_G} (T_s - T_g)$$

$H$ : Echange de chaleur avec l'atmosphère

$$H = \frac{\rho_a c_p}{r_{aH}} (T_s - T_A)$$

$\rho_a$ : Masse volumique de l'air

$c_p$ : Capacité thermique spécifique de l'air

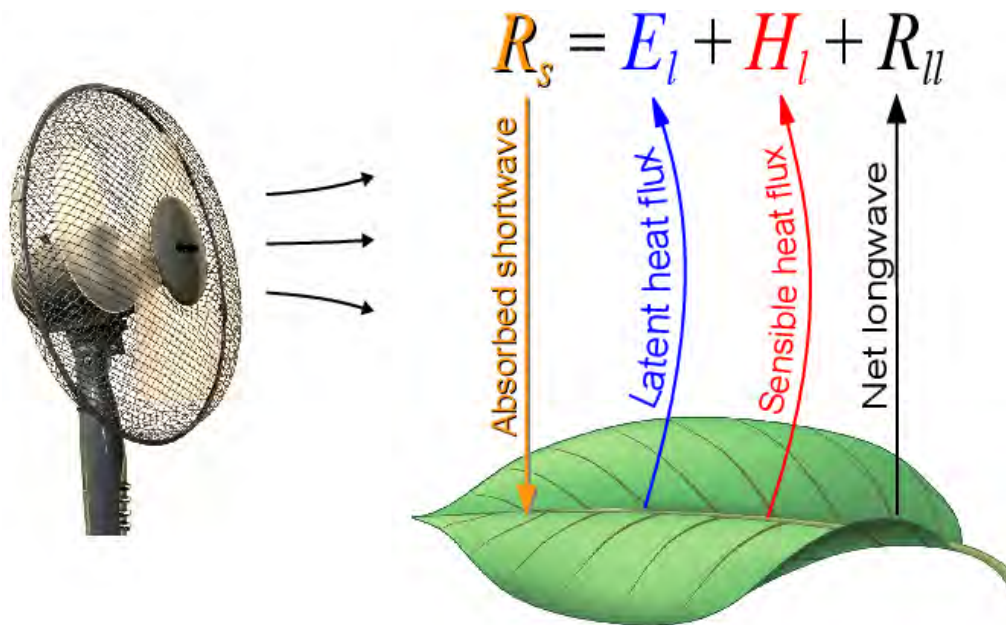
$r_{aH}, r_G$ : Résistance aux flux de chaleur latente

$T_g$ : Température du sol.

## Bilan d'énergie à la surface

$$R_n = \rho_w \lambda E_s + G + H$$

$LE_s$  : Perte d'énergie par évaporation



## Bilan d'énergie à la surface



$$R_n = \rho_w \lambda E_s + G + H$$

$$\rho_w \lambda E_s = \frac{\rho_a c_p}{\gamma^* (r_{av} + r_s)} (e_s^{\text{sat}} (T_s) - e_s)$$

$\rho_a$  : Masse volumique de l'air

$c_p$  : la capacité thermique spécifique de l'air

$\gamma^*$  : constante psychrométrique

$e_{s,\text{sat}}$  : pression de vapeur saturante à la température de la surface

$e_s$  : pression de vapeur saturante de l'atmosphère

$r_{av}$  : résistance aérodynamique

$r_s$  : résistance stomatique

## Bilan d'énergie à la surface

**La résistance** stomatique est pondérée par des fonctions qui représentent l'impact des conditions environnementales.

En conditions optimales, ces fonctions sont égales à 1, sinon elles sont comprises entre 0 et 1.

$$r_s = r_{s,\max} / \left[ \text{LAI} \times F_1 F_2 F_3 F_4 F_5 \right]$$

LAI : Leaf Area Index: surface de feuilles sur surface de sol.  
Varie de 3 à 6 m<sup>2</sup> de feuilles/m<sup>2</sup> de sol dans nos forêts.

F1 dépend du rayonnement solaire (PAR).

F2 décrit les effets du stress hydrique.

F3 tient compte du déficit de pression en vapeur d'eau.

F4 décrit la dépendance à la température.

F5 dépend de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

## Lien avec Penman-Monteith (PM) et ETP-FAO

L'idée de Penman est d'exprimer la saturation en fonction de la température de l'atmosphère:

$$\rho_w \lambda E_s = \frac{\rho_a c_p}{\gamma^* (r_{aV} + r_s)} (e_s^{\text{sat}}(T_s) - e_s)$$

$$e_s^{\text{sat}} \simeq e_a^{\text{sat}} + \Delta (T_a - T_s)$$

$\Delta$  La variation de la saturation en fonction de la température

La ré-écriture de l'équation du bilan d'énergie donne alors la formule de PM

$$\rho_w \lambda E_s = \frac{\Delta (R_n - G)}{(\gamma^* + \Delta)} + \frac{\rho_a c_p}{r_{aV} (\gamma^* + \Delta)} [e_a^{\text{sat}}(T_A) - e_a]$$

$$\gamma^* = \gamma (r_{aV} + r_s) / r_{aV}$$

## Lien avec Penmann-Monteith et ETP-FAO

### La formule de PM-FAO (Allen, 1984)

$$ETP_{FAO} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{891.3}{(T + 273)} \gamma u_2 (e_c - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.336u_2)}$$

C'est la formule de PM avec les hypothèses suivantes:

La végétation est un gazon dense et humide ( $r_s$ )

La hauteur du gazon est de 12 cm ( $r_{av}$ )

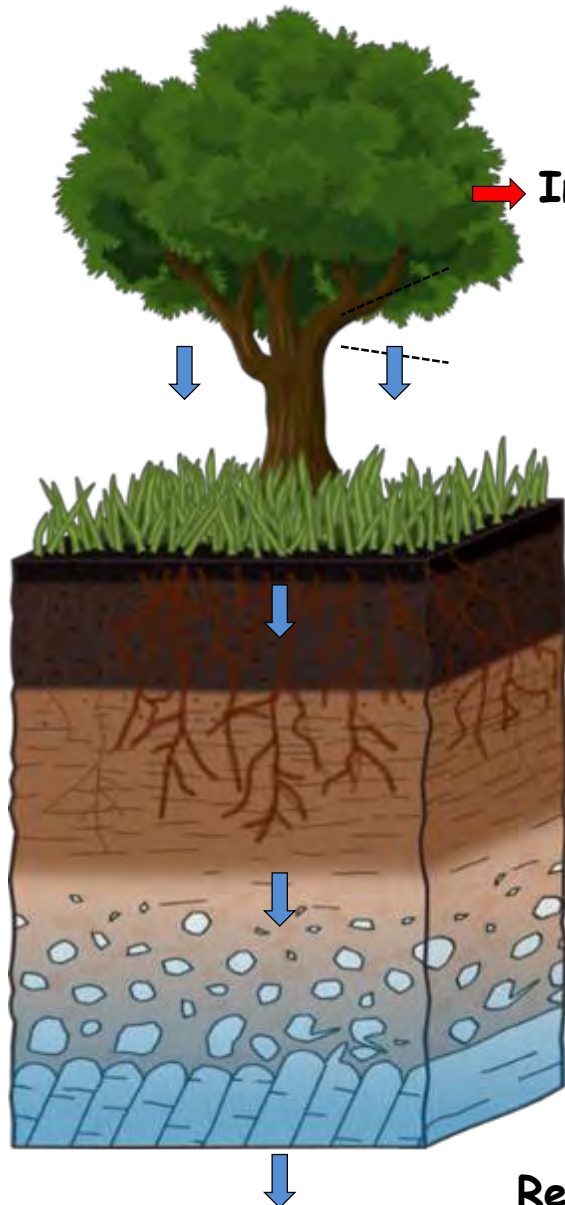
Le vent est mesuré à une hauteur de 2m au-dessus du sol ( $r_{av}$ ).

Attention: ces hypothèses portent :

sur la végétation, corrigées par le coefficient cultural  
la mesure du vent

Precipitation ↓

## Bilan en eau et infiltration à la nappe



→ **Interception**

$$\text{Si } V_L \geq V_c$$

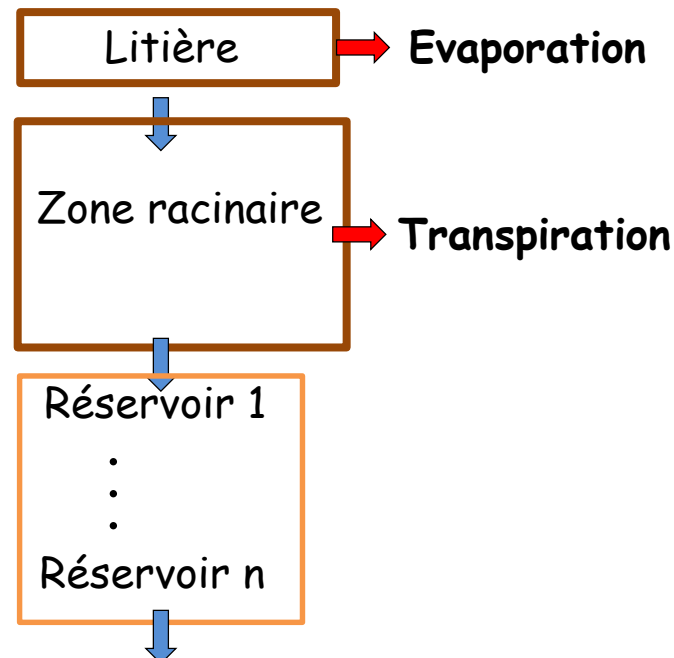
$$\text{Si } V_p \leq V_L \leq V_c$$

$$\text{Si } V_L \leq V_p$$

$$Q_L^n = (V_L - V_c) / \Delta t$$

$$Q_L^n = (e^{\alpha(V_L - V_p)} - 1.00) / \Delta t$$

$$Q_L^n = 0.0$$



**Recharge**

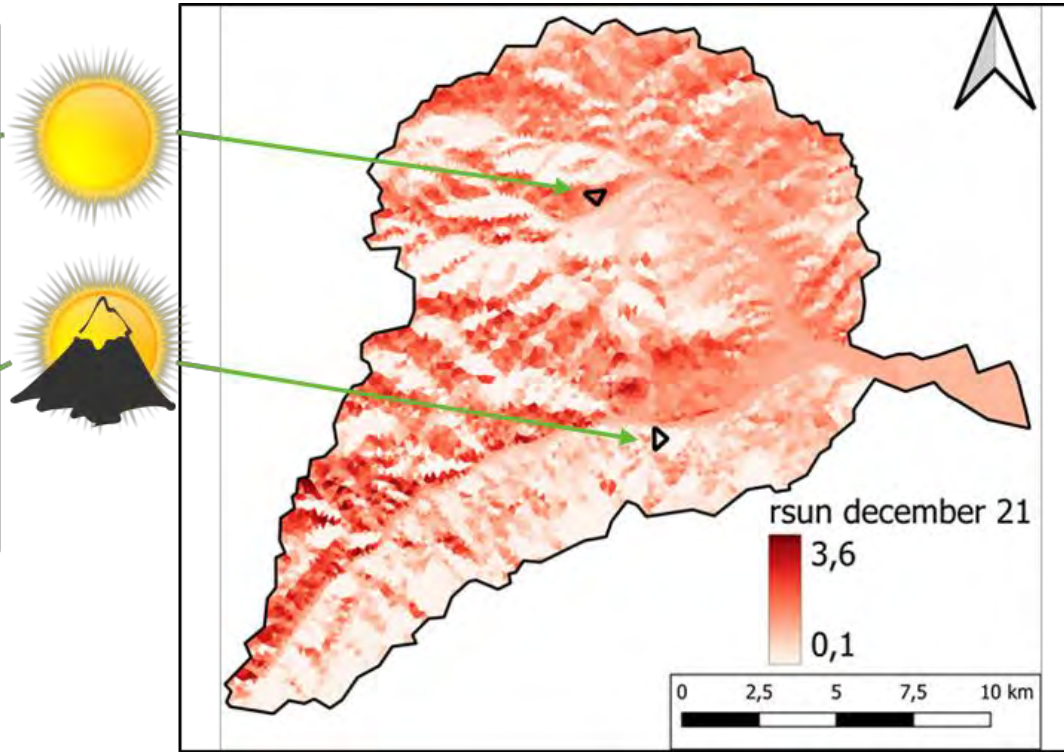
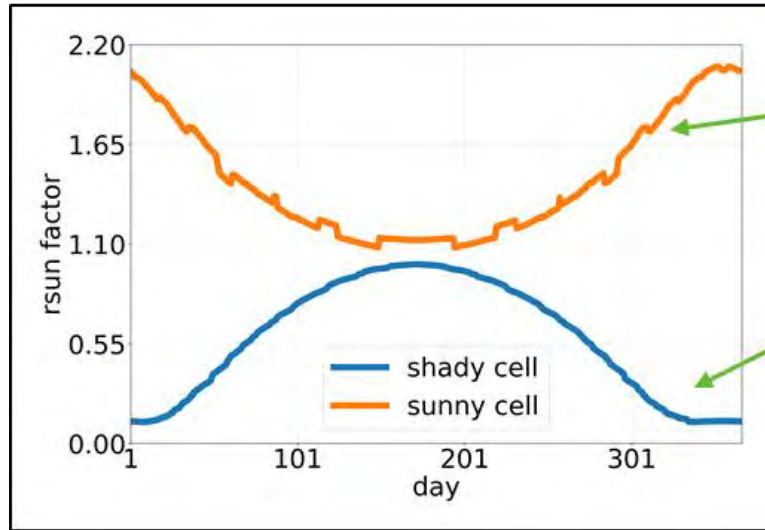


## Liste des paramètres le calcul de la recharge

Paramètres	Type de données	Source	Nombre
Occupation du sol	Satellite	Corine Land Cover	1
Nature des sols	Réf. Régional Pédologique (RRP)		1
Topographie	MNT - IGN		1
Epaisseur du milieu poreux	Calculée	Hylands	1
Orientation / soleil	Calculée	r.sun-QGIS	12
Données climatiques	SAFRAN	Météo France	1/heure
Emissivité	Bibliographie		1
Albédo	Satellite	Copernicus	12
Hauteur de la canopée	Bibliographie		1/végétation
Conductance stomatique	Bibliographie		1/végétation
Coefficient d'extinction	Bibliographie		1/végétation
Coefficient d'interception	Bibliographie		1/
LAI	Satellite	Copernicus	12
Epaisseur de la litière	bibliographie		1/sol
Epaisseur de la zone racinaire	bibliographie		1/sol
Porosité totale	bibliographie	+ RRP	3/sol
Capacité au champ	bibliographie	+ RRP	3/sol
Point de flétrissement	bibliographie	+ RRP	3/sol
Coefficient de drainage	Tests préliminaires		3/sol

# Modélisation du rayonnement solaire

Prise en compte de l'orientation des versants (BV de la Bruche)



# Analyse de sensibilité

Une incertitude est donnée à chaque paramètre (min, max):  
soit mesurée  
soit issue de la littérature

Une simulation est effectuée en choisissant au hasard une valeur pour chaque paramètre.

Plusieurs dizaines de milliers de simulations sont effectuées (Méthode de Monté Carlo) en quelques heures.

On aura donc plusieurs dizaines de milliers de valeurs plausibles de recharge de nappe à un temps donné et pour un endroit donné.

Si l'on fait l'analyse pour un seul paramètre et que les dizaines de milliers de valeurs de recharge sont proches, le paramètre sera dit peu sensible et donc son évaluation n'est pas importante.

# Analyse de sensibilité

La méthode est plus complexe car tous les paramètres varient en même temps.

La sensibilité est quantifiée par des indices.

On construit un histogramme avec les dizaines de milliers de valeurs de recharge. On compare l'histogramme obtenu avec tous les paramètres avec l'histogramme obtenu en imposant un seul paramètre. (**indice de Borgonovo**).

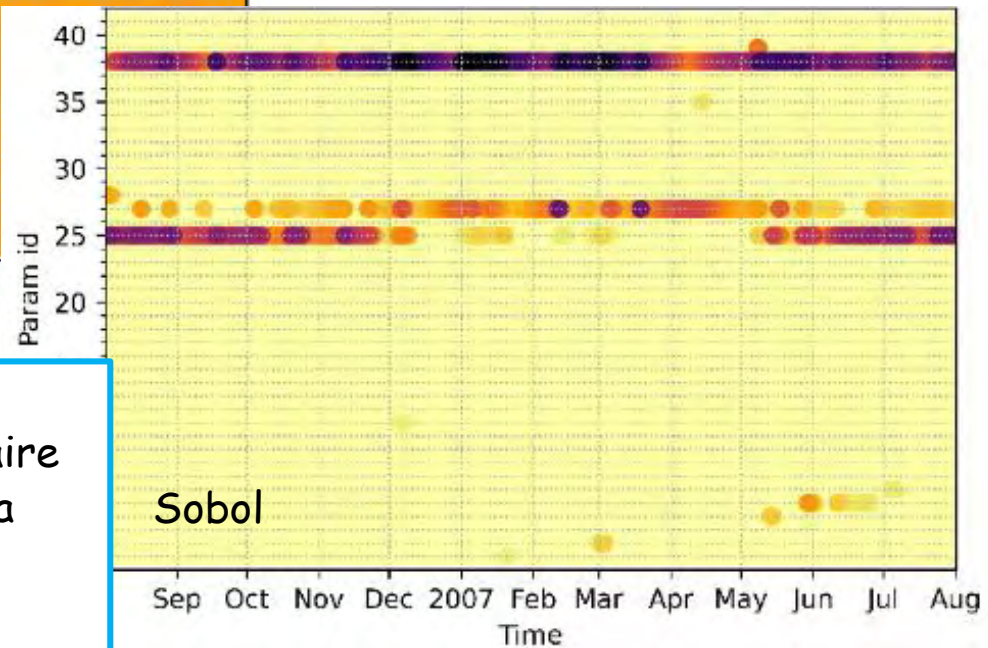
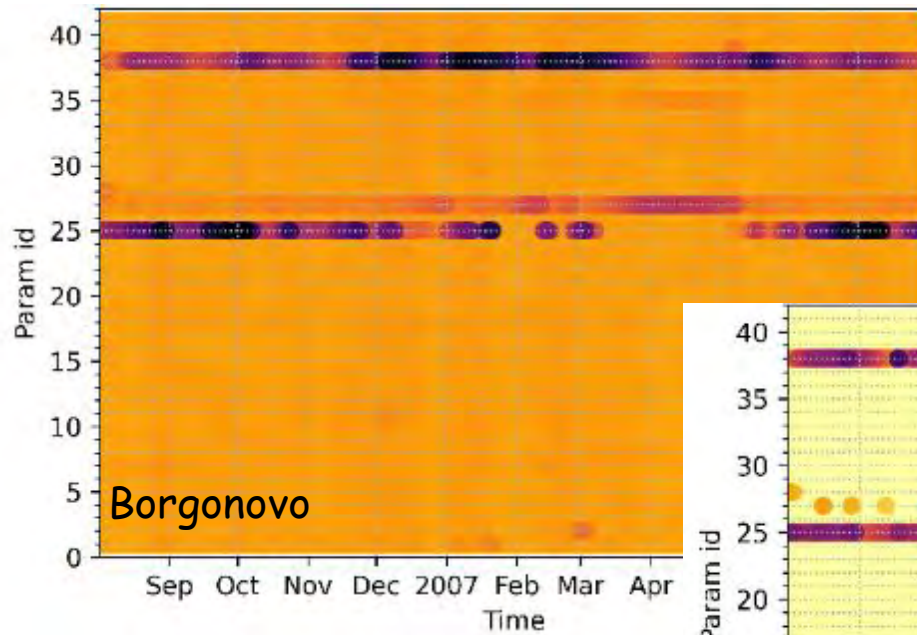
On calcule la variance de la recharge à l'aide des dizaines de milliers de valeurs et on évalue la contribution de la variance des paramètres à la variance de la recharge (**indice de Sobol**).

Ces deux indices varient entre 0 et 1,

0 le paramètre 'ne sert à rien'.

1 Les résultats du modèle sont très sensibles à la valeur du paramètre.

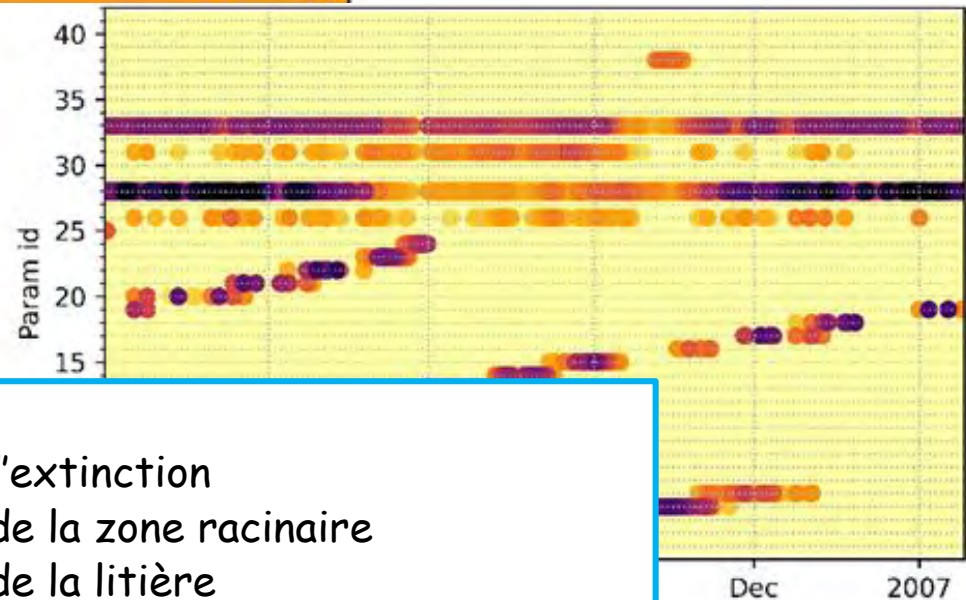
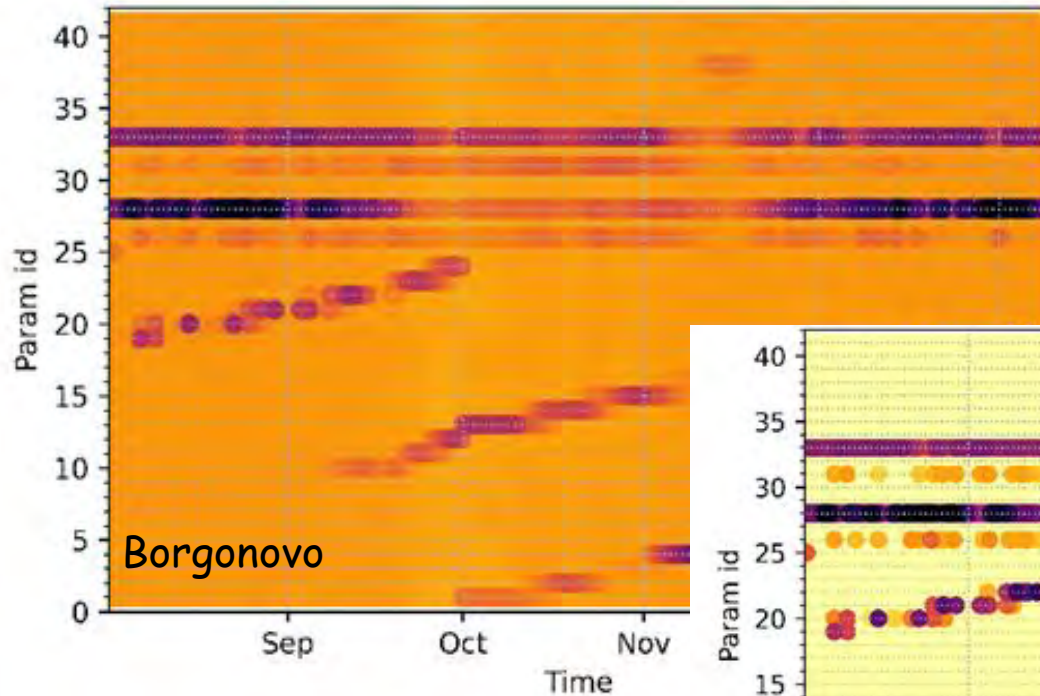
# Analyse de sensibilité : recharge



- Interception
- Profondeur de la zone racinaire
- Coefficient de drainage de la zone racinaire
- Profondeur de la litière

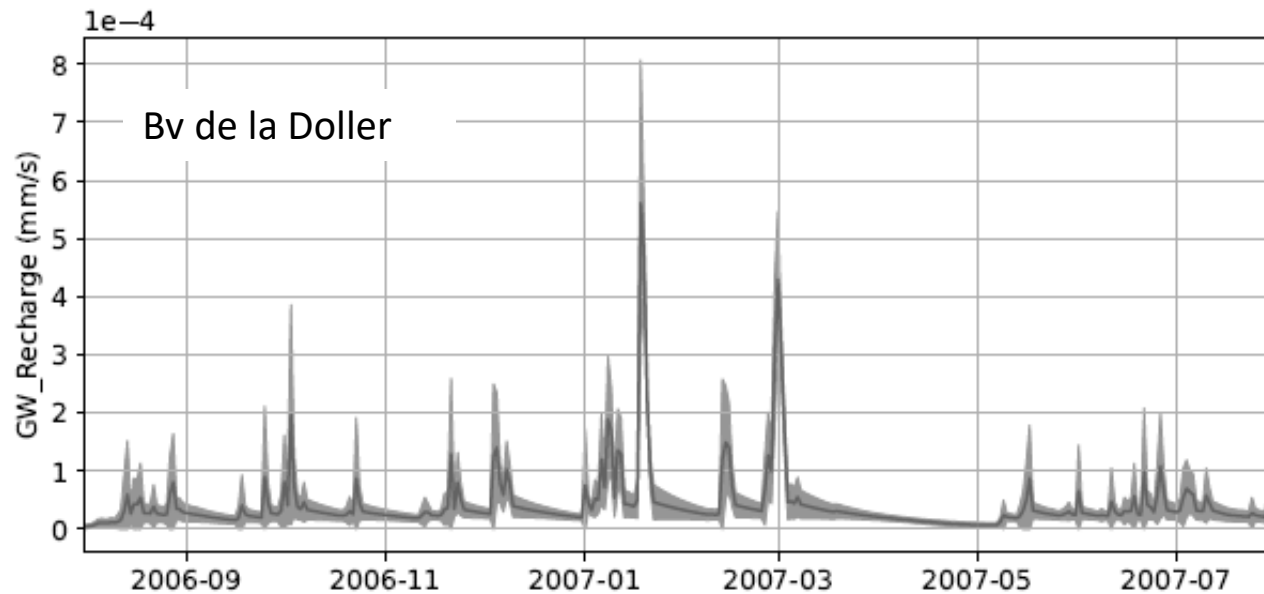
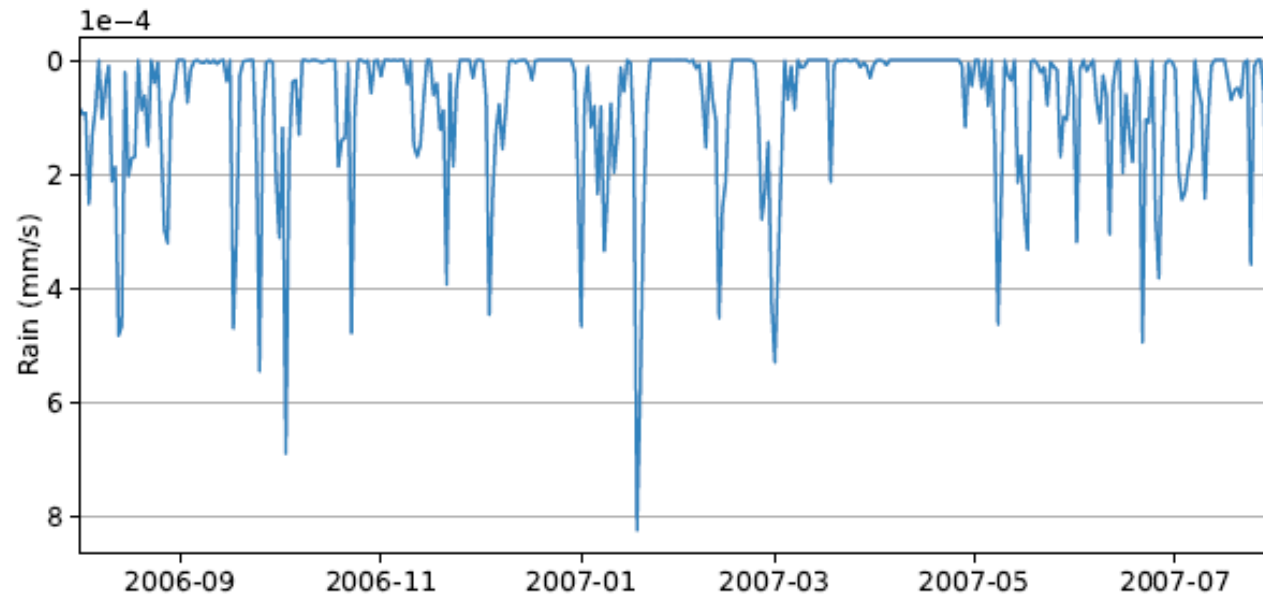


# Analyse de sensibilité : transpiration



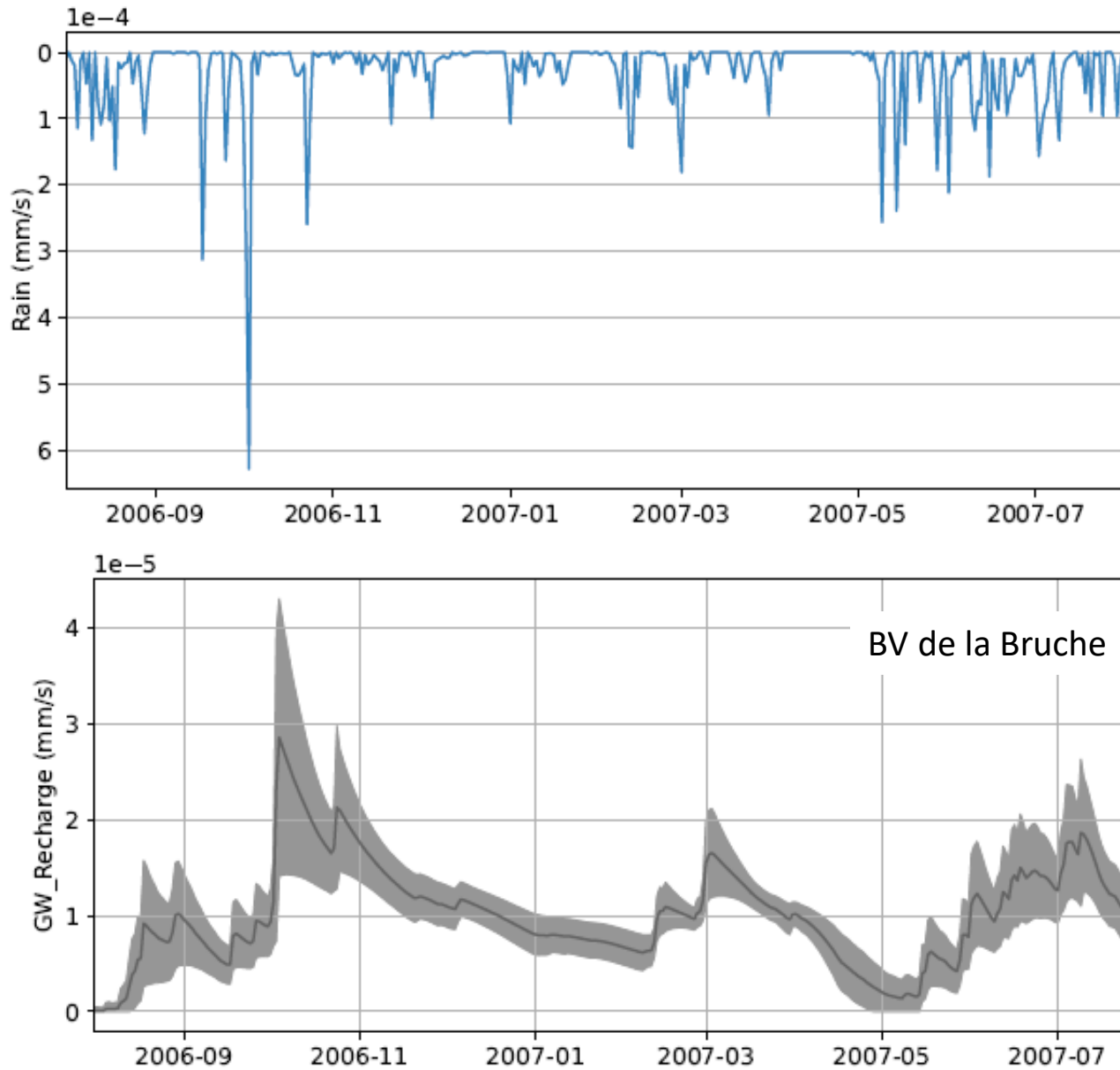
- LAI, Albedo
- Coefficient d'extinction
- Profondeur de la zone racinaire
- Profondeur de la litière
- Conductance stomatique
- Coefficient de drainage de la zone racinaire

# Calcul de la recharge



Aprona : méthodes d'évaluation de la recharge applicables en nappe d'alsace - 17/10/2023

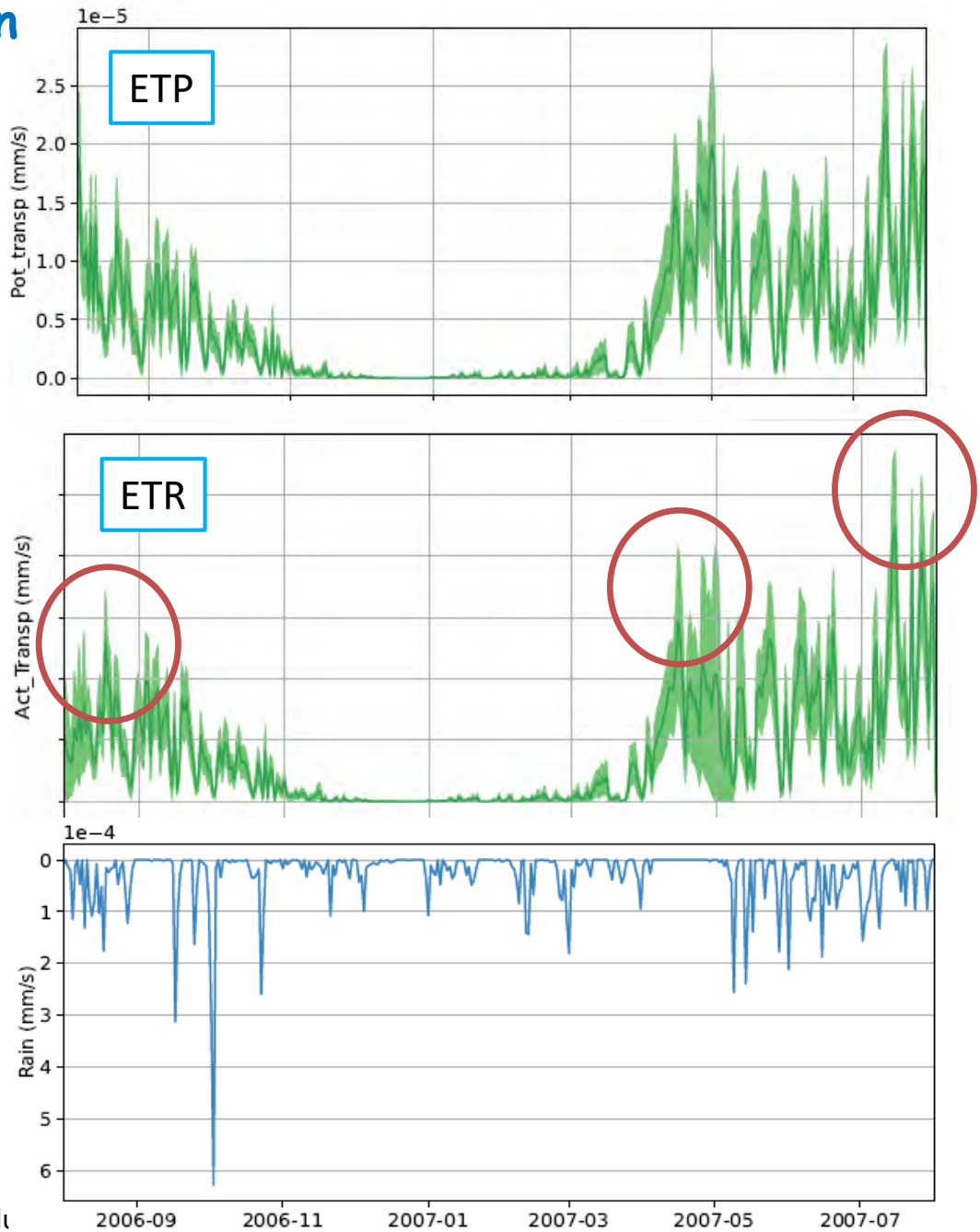
## Calcul de la recharge



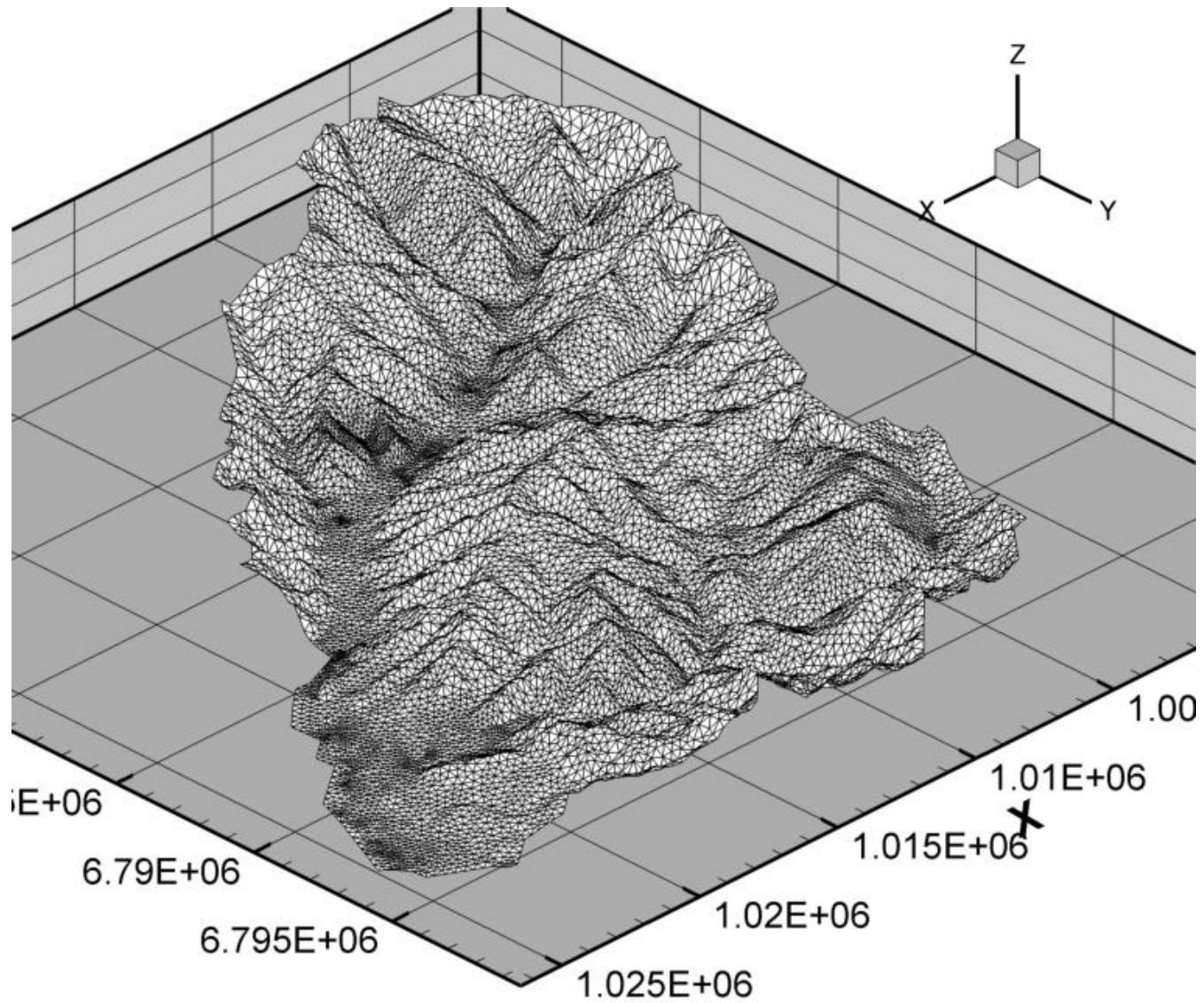


# Calcul de la transpiration

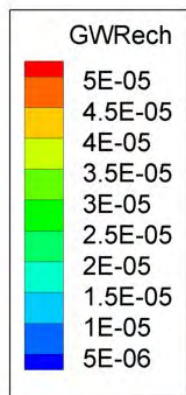
BV de la Doller



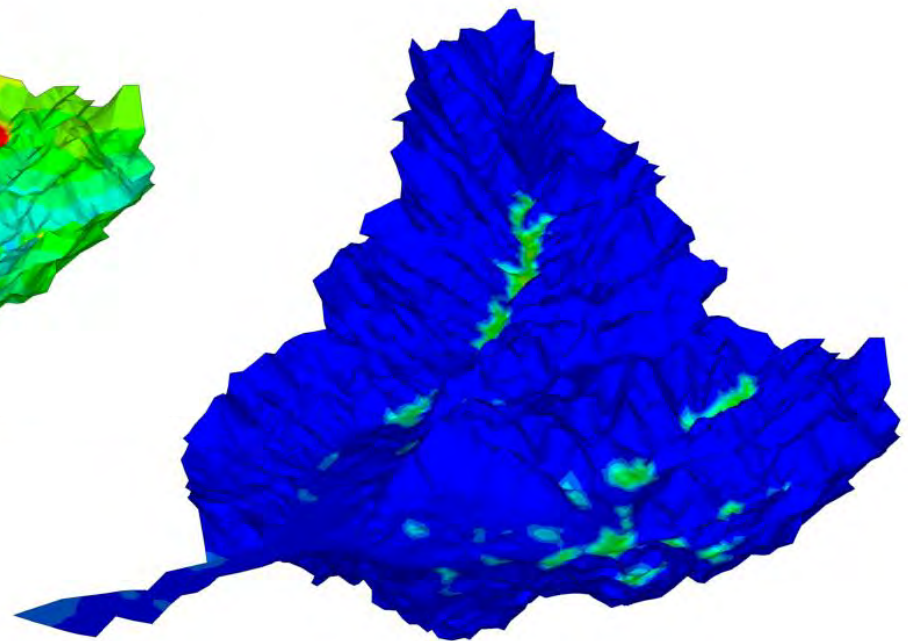
## Couplage avec NIHM



## Couplage avec NIHM - BV de la Bruche



Janvier



Juillet

## Conclusion

Le calcul du bilan en énergie permet une évaluation rigoureuse de l'ETP, notamment avec la prise en compte de la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Ces modèles sont très gourmands en données.

L'analyse de sensibilité permet d'identifier les données les plus importantes.

L'analyse de sensibilité permet de réduire les nombres de données pour adapter le modèle à un contexte régional.

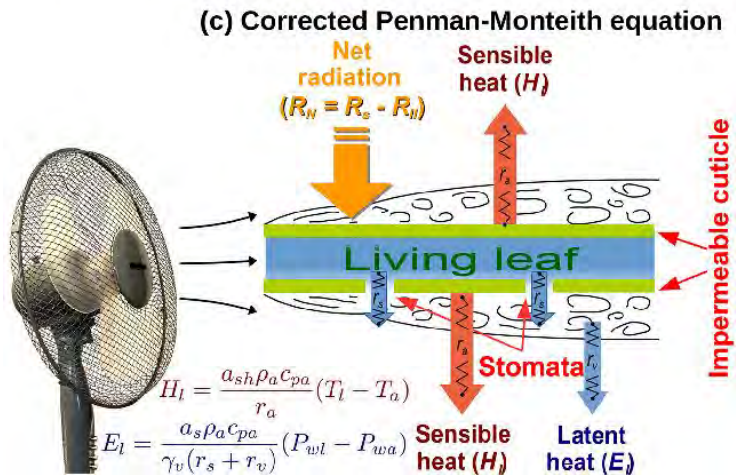
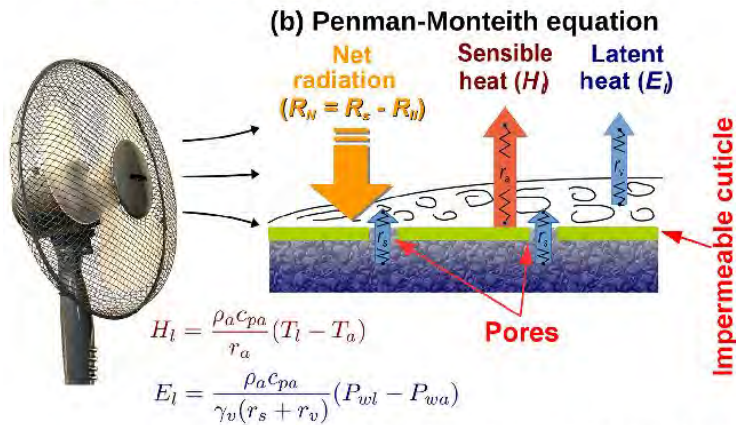
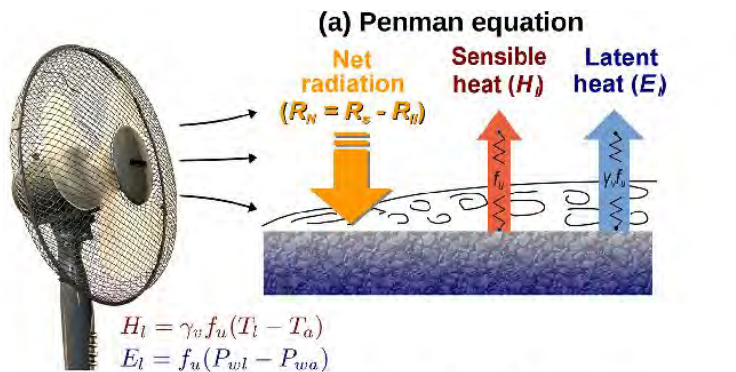




**Merci pour votre attention**







. Schymanski, D. Or, 2016

$$H = \rho c_p \frac{T_s - T_A}{r_{ah}}$$

$$LE_s = L\rho_A \frac{(e_A^{\text{sat}}(T_s) - e_A)}{r_{aE} + r_s}$$

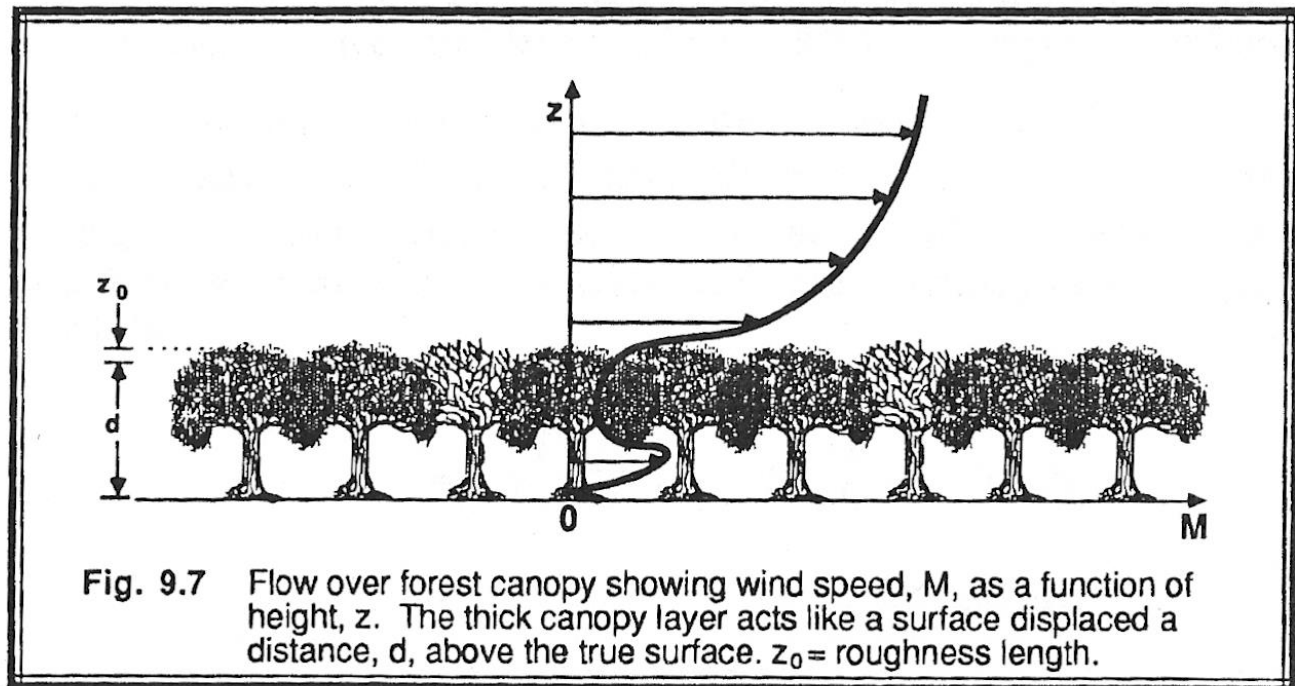
## 1.1 Resistance to atmospheric heat flux (aerodynamic resistance)

Different formulations exist ...

### 1.1.1 The most classical formulation

$$r_{aH} = \frac{\ln((z_u - d_u) / z_{ou}) \ln((z_h - d_h) / z_{oh})}{k^2 u_z} \quad (1)$$

$k$ : is von Karman's c  
 $z_{ou}, z_{oh}$ : the roughness length  
 $z_u, z_h$ : height of wind and  
 $d_u, d_h$ : zero plane displacement  
 $u_z$ : wind speed at height

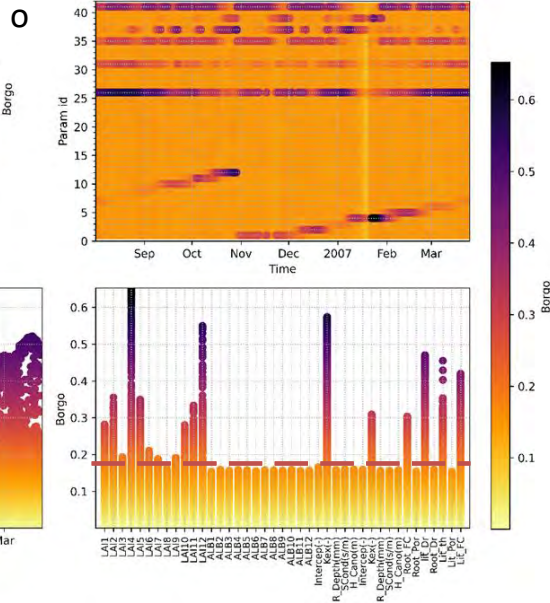




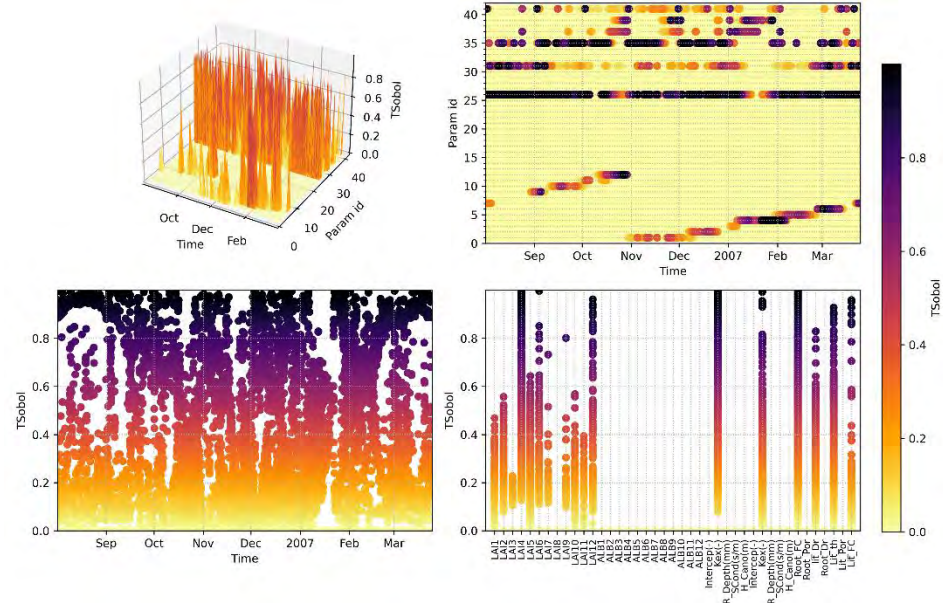
# Analyse de sensibilité

## Évaporation

Borgonov



Sobol Total



- LAI
- Coefficient d'extinction
- Points de flétrissement
- Coefficients de drainage
- Profondeur de la litière