

Modélisation des aquifères et des eaux superficielles

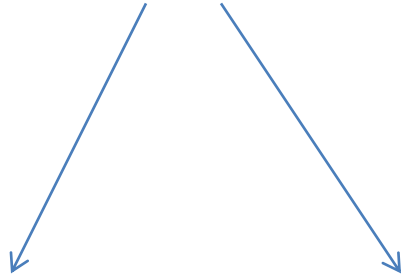
Julio Gonçalves

CEREGE

Aix-Marseille Université

Une tradition bien française...

Hydrology Anglo-saxon

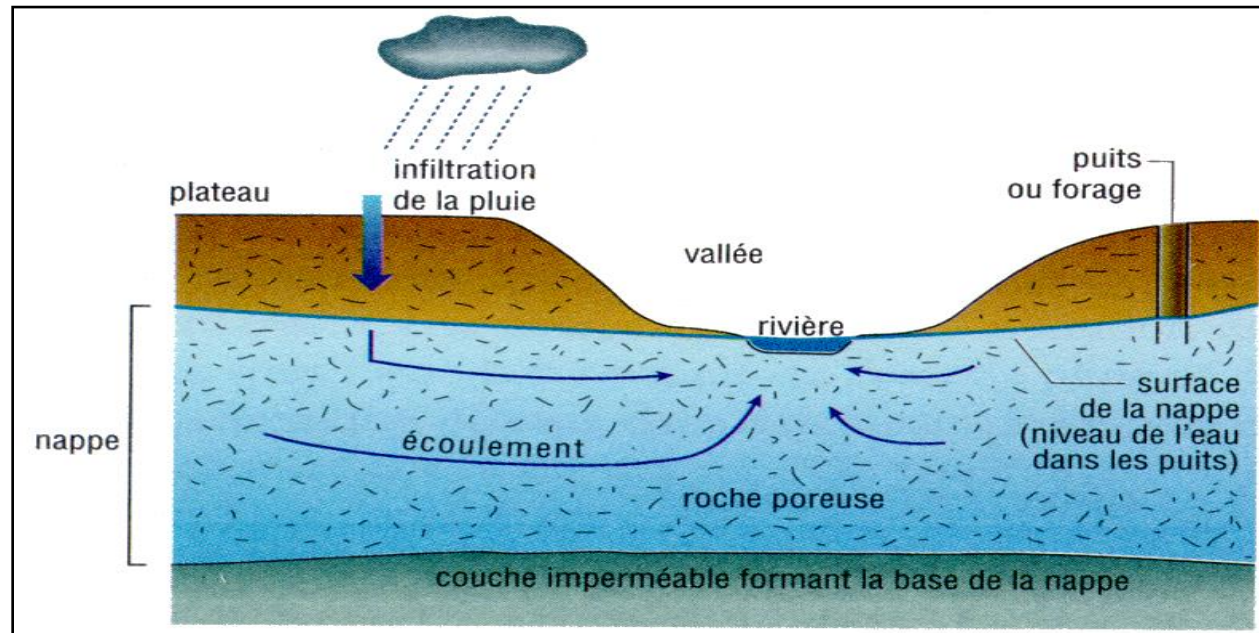


Hydrologie

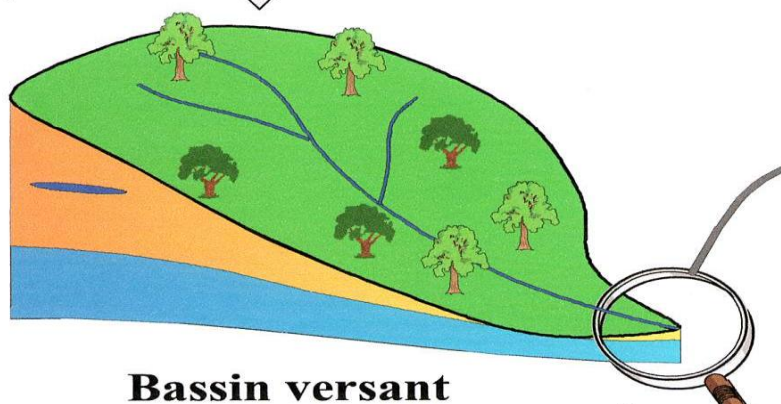
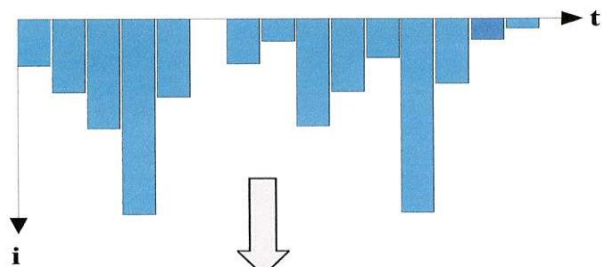
Hydrogéologie

Écoulements
de surface

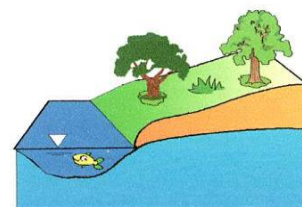
Écoulements
souterrains



Hyétogramme

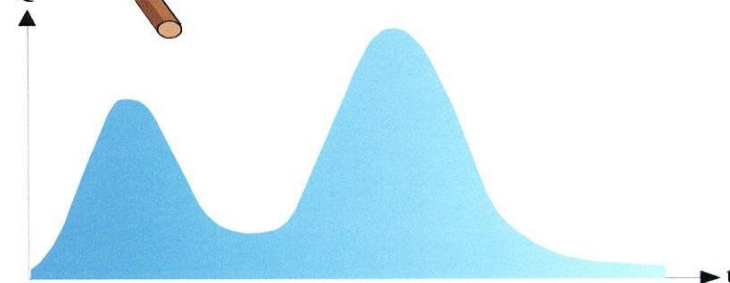


Section de contrôle



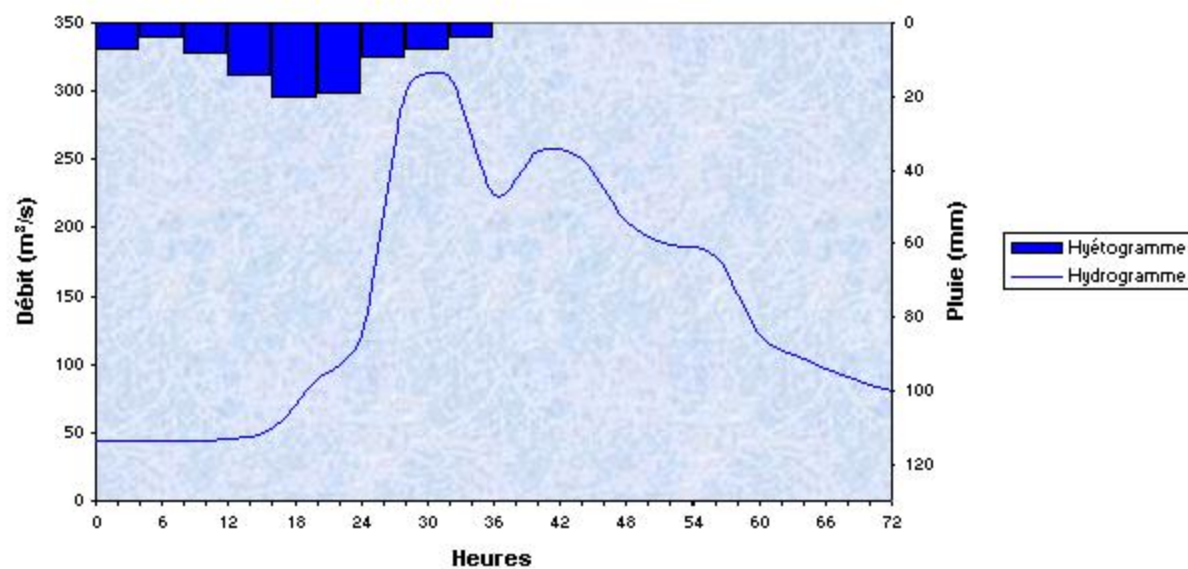
Bassin versant

Q

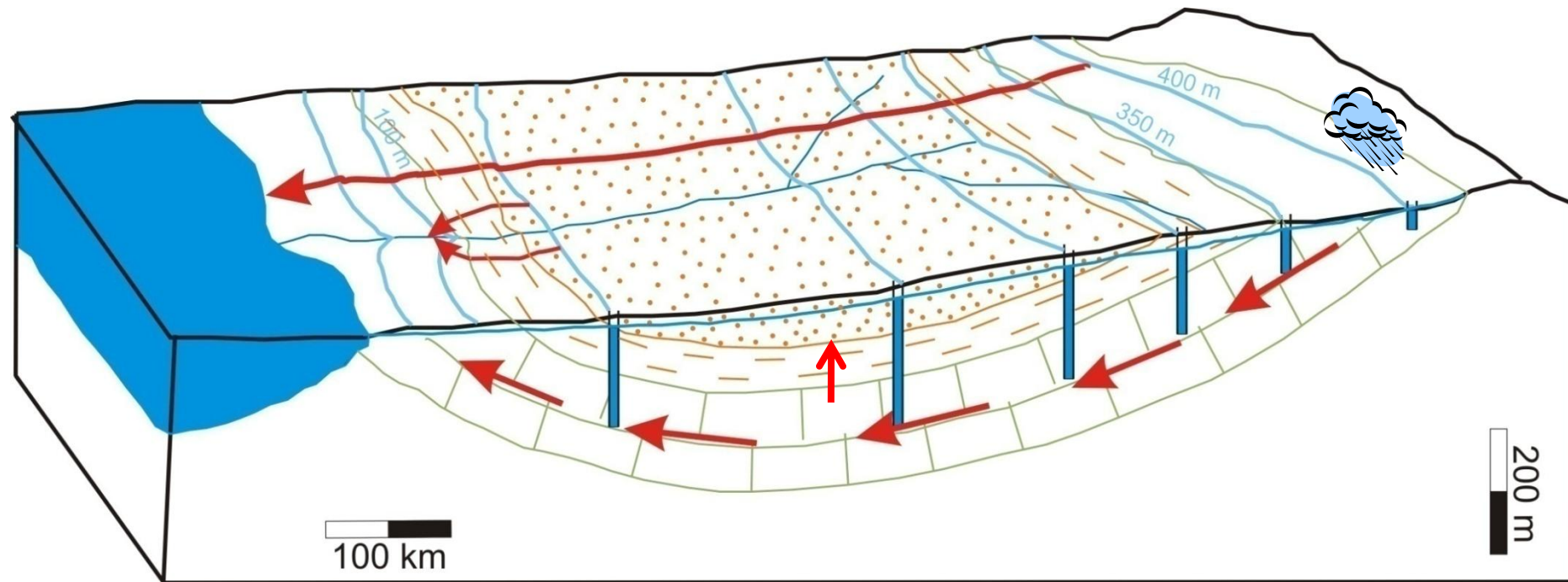


Hydrogramme

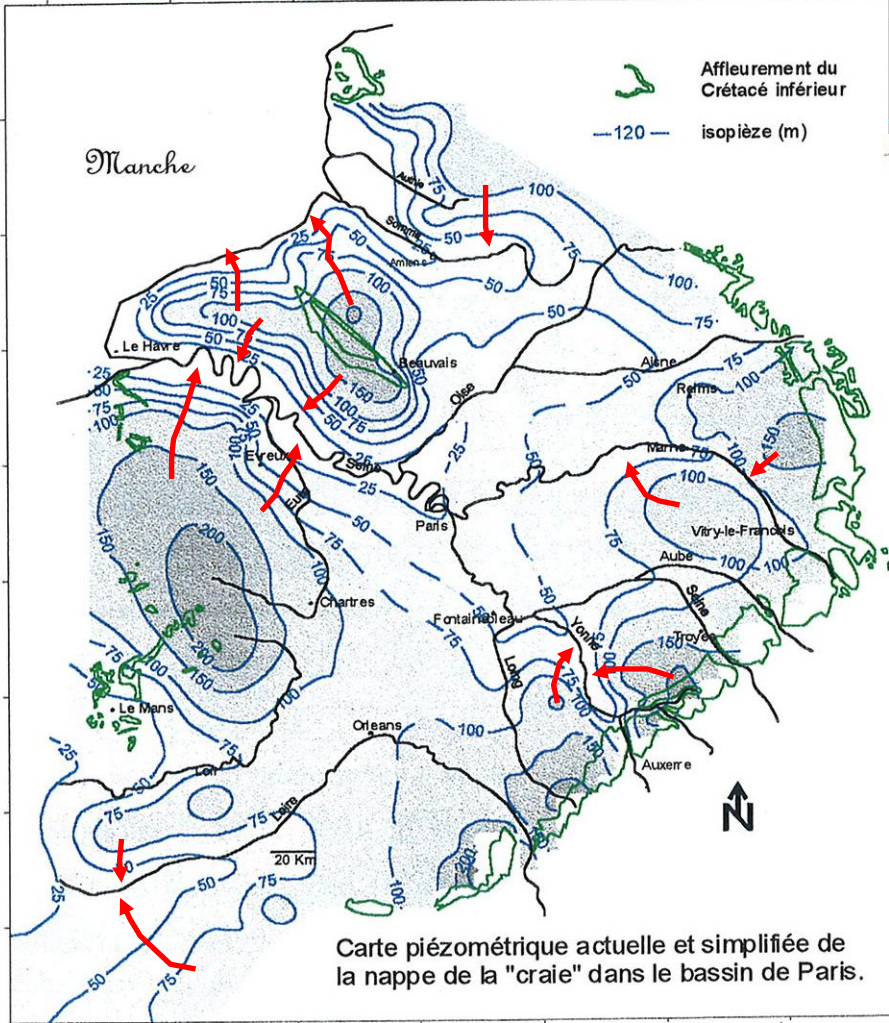
Crue de l'Ariège du 5 octobre 1992



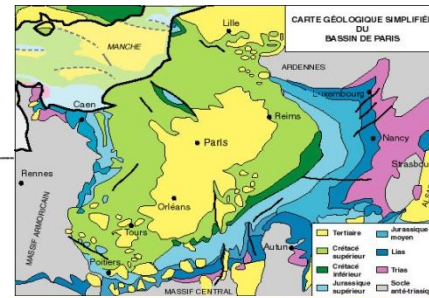
- **Aquifère** : corps (couche ou massif) de roches perméables comportant une zone saturée et suffisamment conducteur d'eau pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables.
- **Aquitard** (ou semi-perméable) : milieu de faible perméabilité dans lequel les prélèvements sont inefficaces mais où un écoulement non négligeable peut se produire amenant de l'eau par drainance aux aquifères adjacents.
- **Nappe** : ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique
- **Perméabilité** : capacité d'un milieu à conduire de l'eau



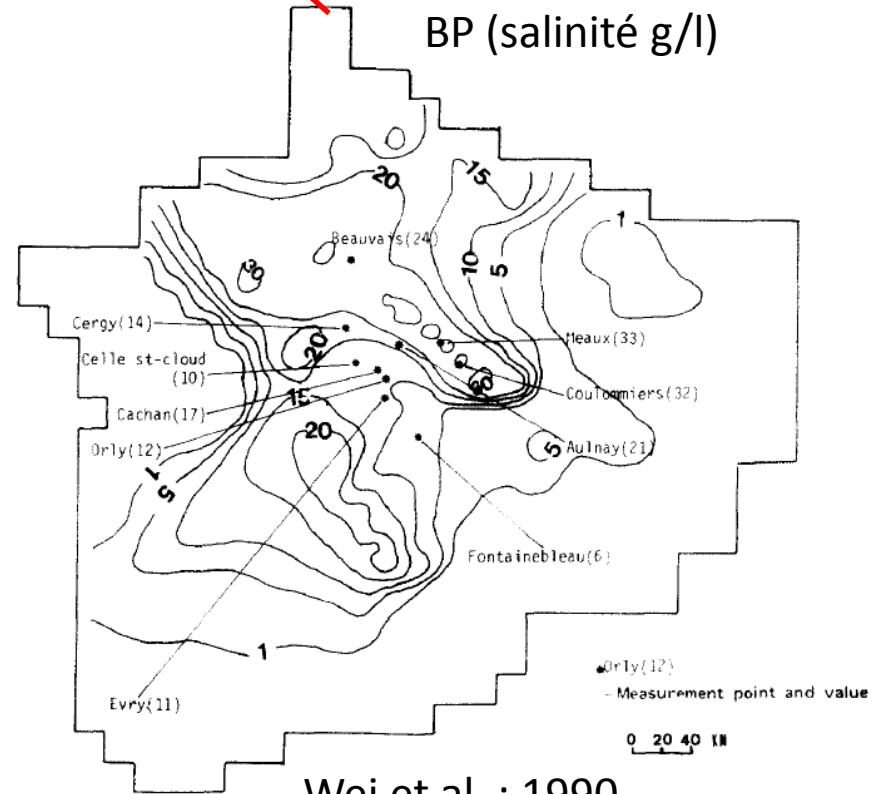
Exple: Aquifère de la Craie (BP)



Raoult (1999)



Carte traceurs:
Exple: Aquifère **Dogger**
BP (salinité g/l)



Wei et al. ; 1990

- Les modèles 'boîte noire'

Variables d'entrée →

Fonction de transfert
mathématique

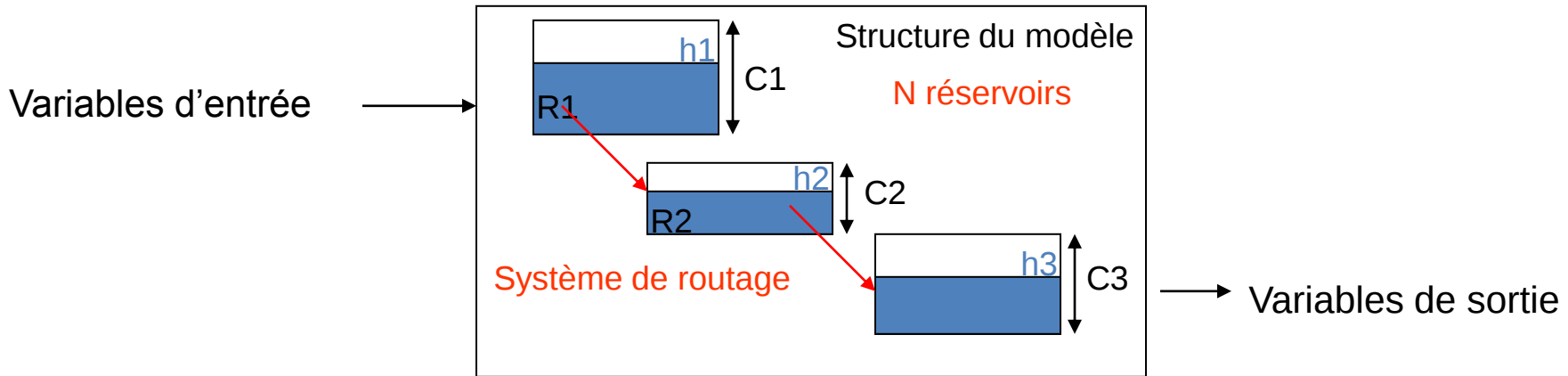
→ Variables de sortie

Modèles globaux, linéaires ou non-linéaires, paramétrés.

Intérêt : connaissance physique du BV inutile

Exemples : ARMAX, réseaux de neurones, **hydrogramme unitaire (HU)**

- Les modèles conceptuels à réservoirs



Modèles globaux ou semi-distribués, linéaires ou non-linéaires, paramétrés.

Intérêts : Parcimonieux, rapide à mettre en œuvre, utile en hydrologie opérationnelle

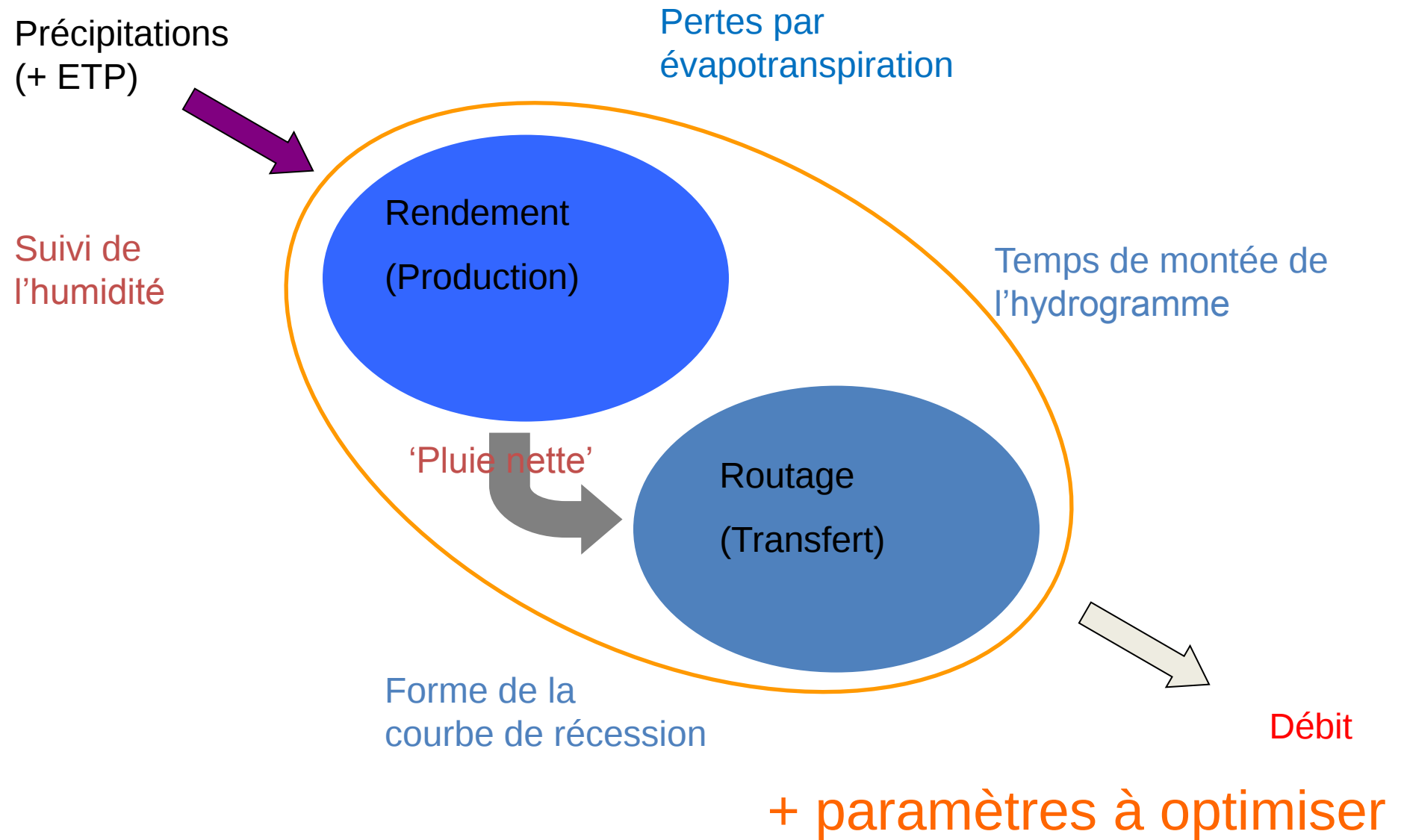
Exemples : TOPMODEL, modèles GR (CEMAGREF)

- Les modèles fondés sur la physique

Modèles distribués, paramétrés.

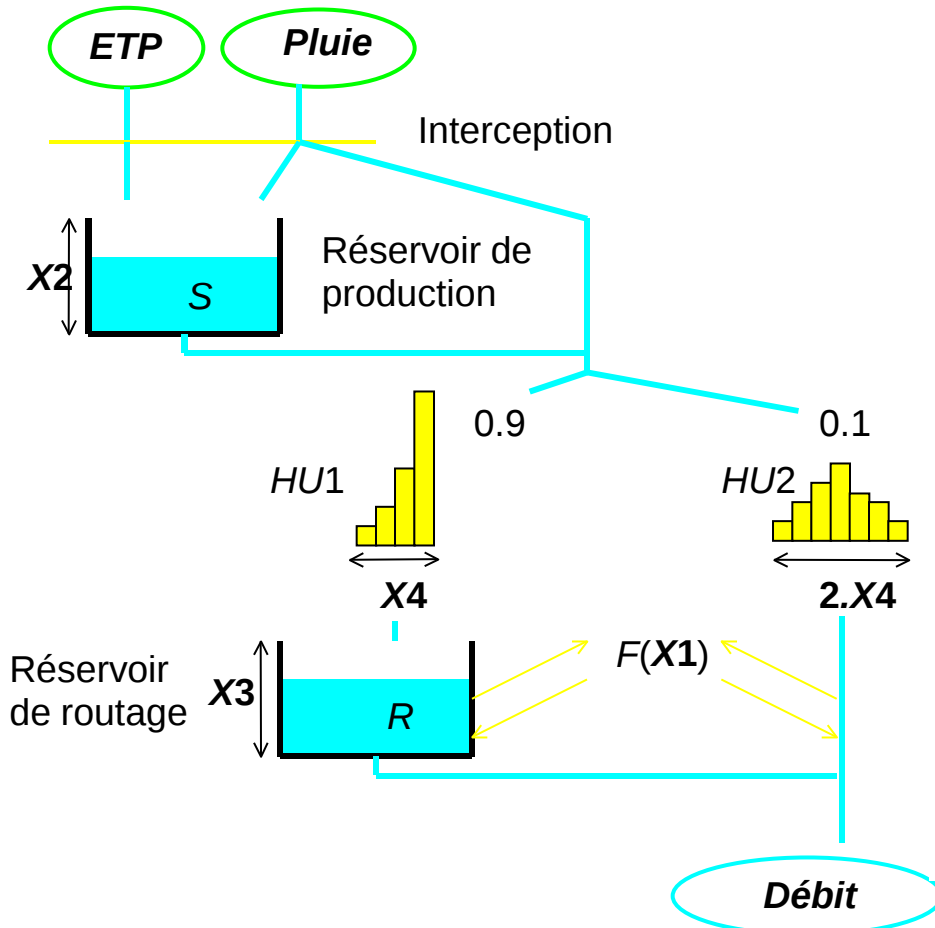
Intérêt : basé sur des fondements physiques Exemples : MIKE-SHE, NEWSAM, MODFLOW .

Structure générale d'un modèle hydrologique

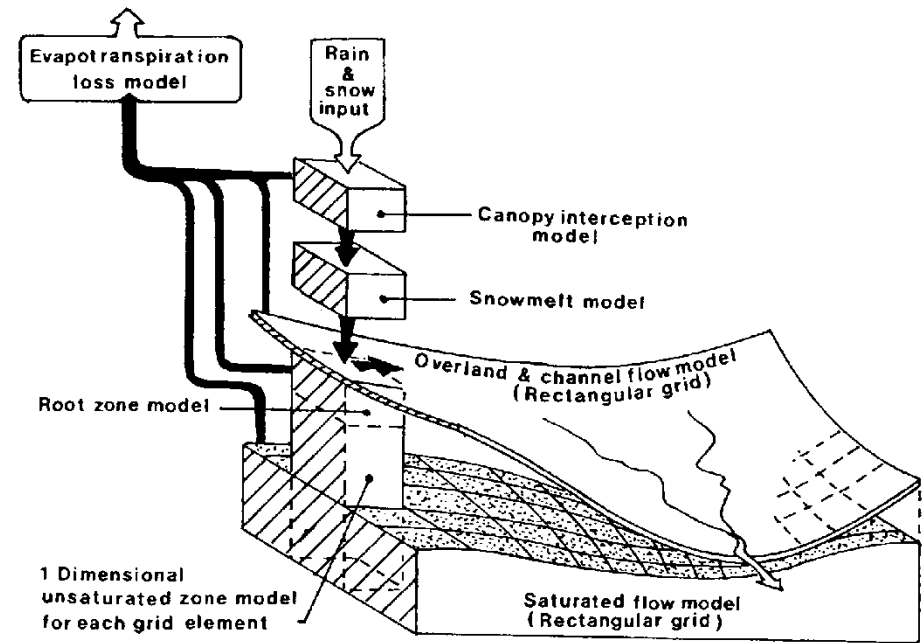


Exemple de modèles hydrologiques

Le modèle GR4J



Le modèle MIKE-SHE



- Les modèles 'boîte noire'

Variables d'entrée →

Fonction de transfert
mathématique

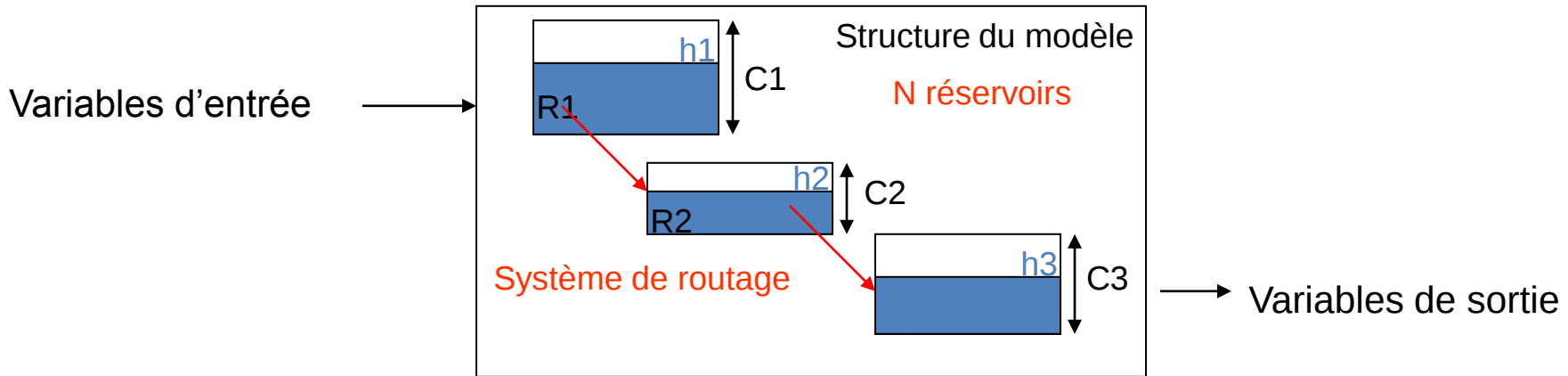
→ Variables de sortie

Modèles globaux, linéaires ou non-linéaires, paramétrés.

Intérêt : connaissance physique du BV inutile

Exemples : ARMAX, réseaux de neurones, **hydrogramme unitaire (HU)**

- Les modèles conceptuels à réservoirs



Modèles globaux ou semi-distribués, linéaires ou non-linéaires, paramétrés.

Intérêts : Parcimonieux, rapide à mettre en œuvre, utile en hydrologie opérationnelle

Exemples : TOPMODEL, modèles GR (CEMAGREF)

- Les modèles fondés sur la physique

Modèles distribués, paramétrés.

Intérêt : basé sur des fondements physiques

Exemples : MIKE-SHE, NEWSAM, MODFLOW.

Les équations de l'hydrogéologie représentent la combinaison de la conservation de la masse (eau, traceurs) , de lois d'écoulement (loi de Darcy, Dispersion cinématique + Diffusion) et éventuellement de lois de déformation des milieux poreux (couplage hydro-mécanique)

Il résulte de cette combinaison des EDP dont la résolution pour des milieux naturels hétérogènes (perméabilité, porosité,...) ne peut être que numérique (Différences ou Volumes finis, éléments finis) sur des nœuds de calculs.

Ces approches numériques reviennent à écrire le bilan de masse sur des volumes élémentaires entourant chaque nœud.

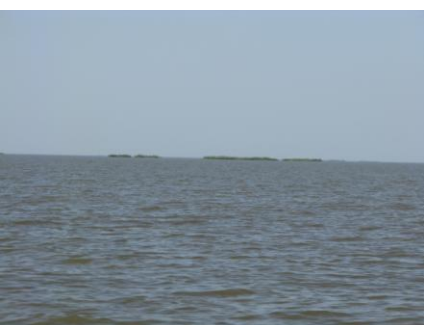
- Ecoulement: $\text{div}(\mathbf{K} \text{grad } h) = S \partial h / \partial t$

- Transport: $\text{div}(-\mathbf{U}C + \mathbf{D} \text{grad } C) = \omega \partial C / \partial t$

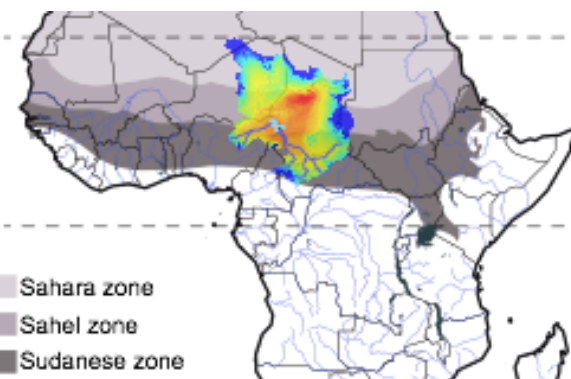
Un exemple de modèle conceptuel : bilan de masse du lac Tchad (Thèse Camille Bouchez)



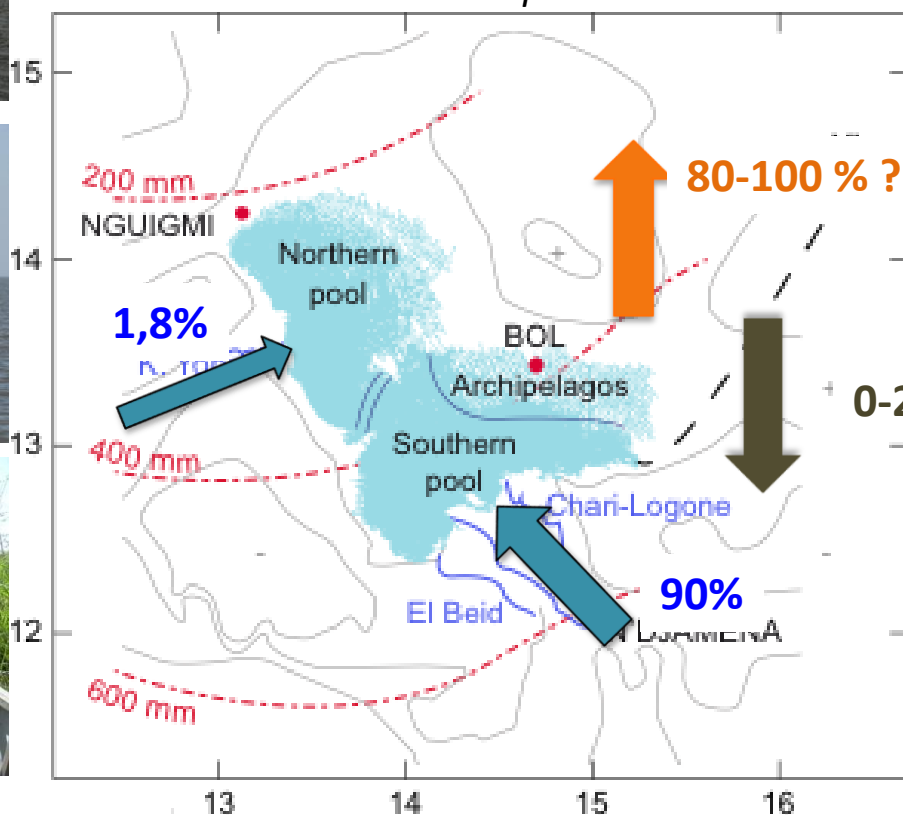
Au cœur de la bande sahélienne, un lac soumis
à une évaporation très forte (environ 2 m/an)
et des eaux douces (salinité=0)



$BV 2.5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$
lac endoréique



$BV \text{ hydro } 0.8 \cdot 10^6 \text{ km}^2$

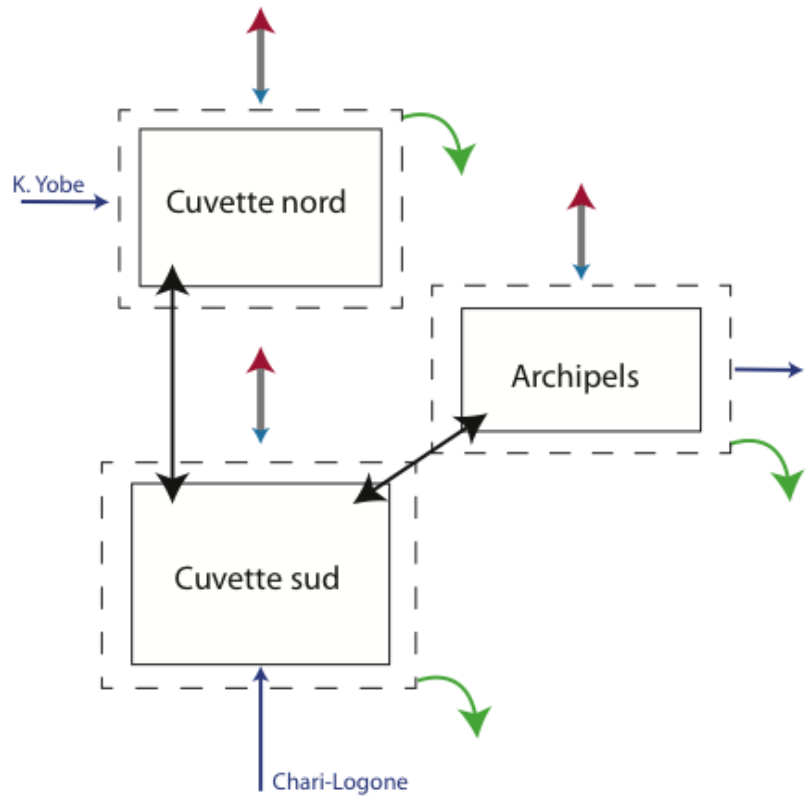
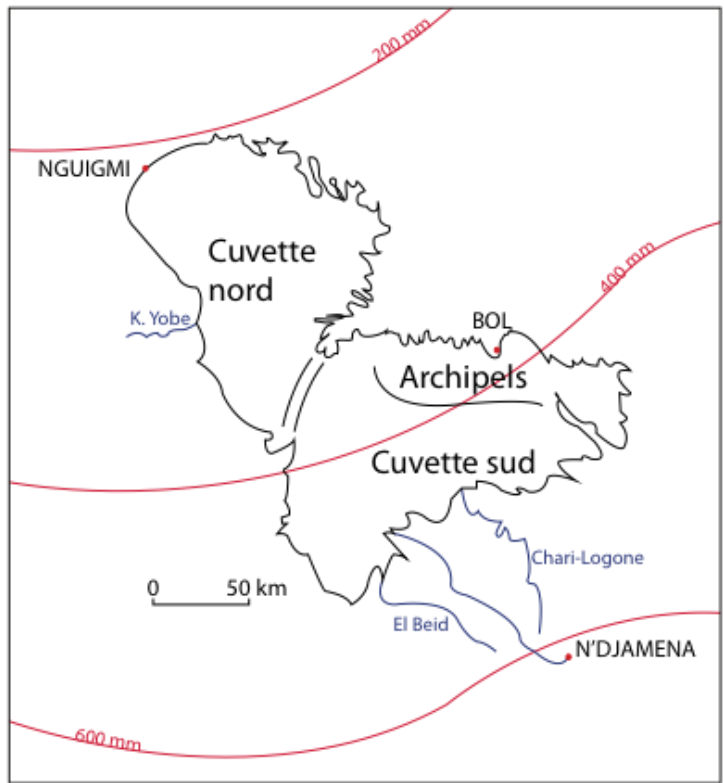


Quel est le rôle de
l'infiltration dans la
régulation chimique ?

Comment estimer l'infiltration ?

- >> Difficilement mesurable par estimations directes (mesures)
- >> Estimation indirecte : inconnu dans le bilan de masse
- >> Modélisation

Etape 1 : D'un système complexe à la conceptualisation, un choix entre parcimonie et réalisme



Variables d'entrée connues	Paramètres inconnus
↑↓ Evaporation/Pluie	↘ Infiltration
↑ Flux des rivières	↔ Paramètres d'échange

Etape 2 : Ecriture d'un **bilan de masse** adaptée au **schéma conceptuel** choisi et **discretisation numérique**

Intérêt de **coupler les méthodes** : plus de contraintes sur la valeur de I qui doit satisfaire le bilan hydrologique, et le bilan chimique et le bilan isotopique

Bilan de masse **hydrologique**

$$\begin{aligned} \frac{\delta V_S}{\delta t} &= [S_S \cdot (P_S - E_S - I) + Q_{Chari} - Q_{SN} - Q_{SA}]_{t-\delta t} \\ \frac{\delta V_A}{\delta t} &= [S_A \cdot (P_A - E_A - I) + Q_{SA} - QF]_{t-\delta t} \\ \frac{\delta W_N}{\delta t} &= [ST_N \cdot (P_N - E_N - I) + Q_{KY} - Q_{SN}]_{t-\delta t} \qquad (1) \\ W_N &= V_N(H_N + ZR); ST_N = S_N(H_N + ZR) \\ Q_{SA} &= 0.0864 \cdot (A0_{SA} + A1_{SA} \cdot ZC_{SA}) \cdot ZC_{SA}^{5/3} \cdot D_{SA}^{1/2} \\ Q_{SN} &= 0.0864 \cdot (A0_{SN} + A1_{SN} \cdot ZC_{SN}) \cdot ZC_{SN}^{5/3} \cdot D_{SN}^{1/2} \end{aligned}$$

Bilan de masse **chimique** (soluté, sodium)

$$\begin{aligned} \frac{\delta(V_S.C_S)}{\delta t} &= [S_S.(P_S.C_P - I.C_S) + Q_{Chari}.C_{Chari} \\ &\quad - Q_{SN}.C_{S/N} - Q_{SA}.C_{S/A}]_{t-\delta t} \\ \frac{\delta(V_A.C_A)}{\delta t} &= [S_A.(P_A.C_P - I.C_A) + Q_{SA}.C_{S/A} - QF.C_A]_{t-\delta t} \\ \frac{\delta(W_N.C_N)}{\delta t} &= [ST_N.(P_N.C_P - I.C_N) + Q_{KY}.C_{KY} - Q_{SN}.C_{S/N}]_{t-\delta t} \end{aligned} \qquad (6)$$

Bilan de masse **isotopes stables de l'eau**

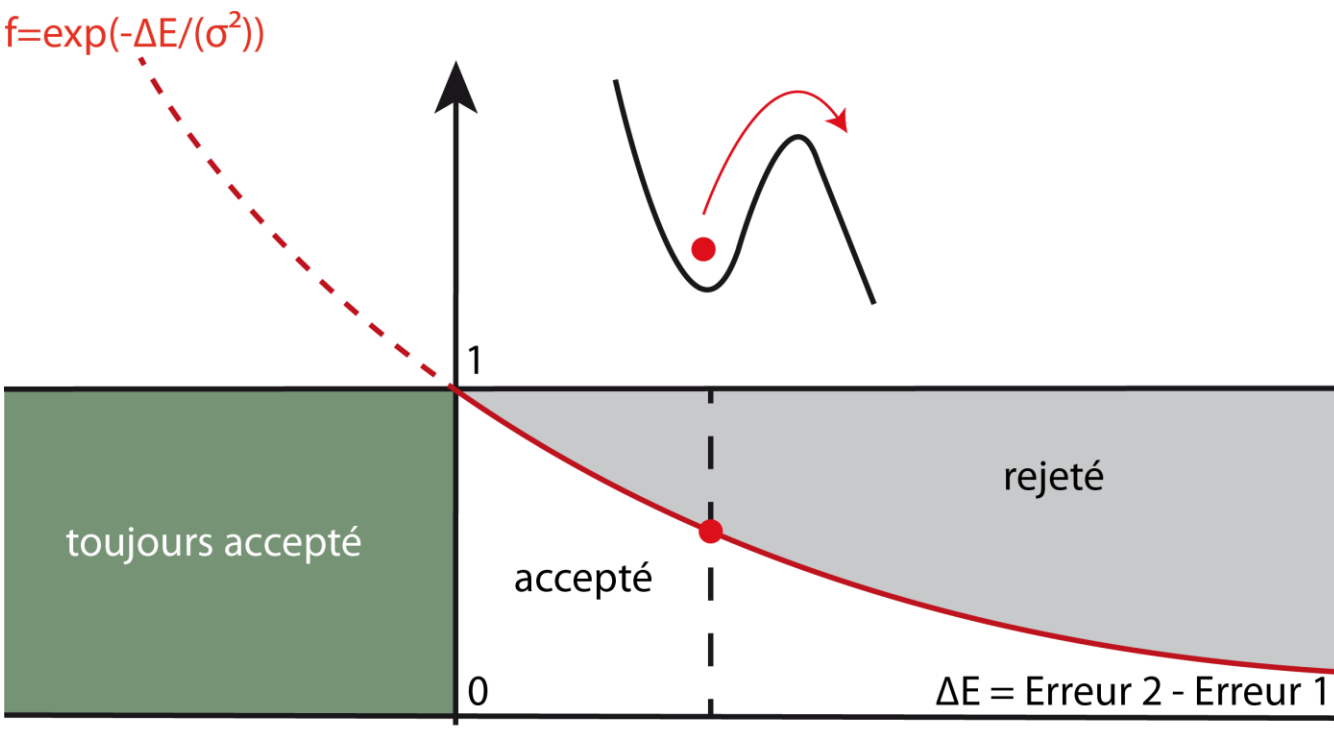
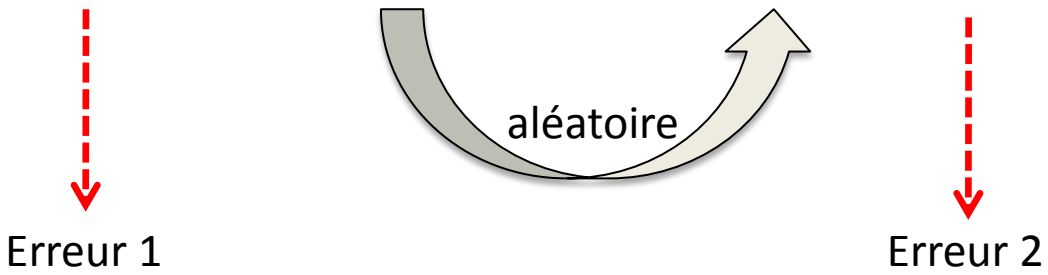
$$\begin{aligned} \frac{\delta(V_S.\delta_S)}{\delta t} &= [S_S.(P_S.\delta_P - I.\delta_S - \alpha.E.\delta_{ES}) + Q_{Chari}.\delta_{Chari} \\ &\quad - Q_{SN}.\delta_{S/N} - Q_{SA}.\delta_{S/A}]_{t-\delta t} \\ \frac{\delta(V_A.\delta_A)}{\delta t} &= [S_A.(P_A.\delta_P - I.\delta_A - \alpha.E.\delta_{EA}) + Q_{SA}.\delta_{S/A} \\ &\quad - QF.\delta_A]_{t-\delta t} \\ \frac{\delta(W_N.\delta_N)}{\delta t} &= [ST_N.(P_N.\delta_P - I.\delta_N - \alpha.E.\delta_{EN}) + Q_{KY}.\delta_{KY} \\ &\quad - Q_{SN}.\delta_{S/N}]_{t-\delta t} \end{aligned} \qquad (7)$$

Etape 3 : Méthode Monte Carlo par Chaine de Markov (MCMC) pour l'estimation des paramètres

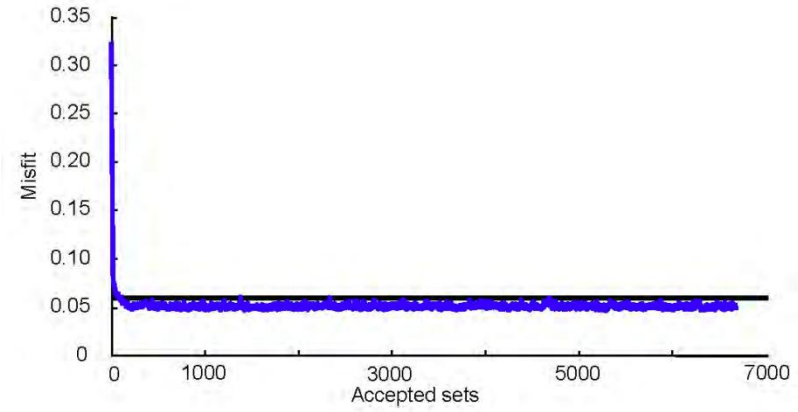
Définition d'une fonction erreur= $f(\text{simulations, observations})$

Jeu de paramètres 1

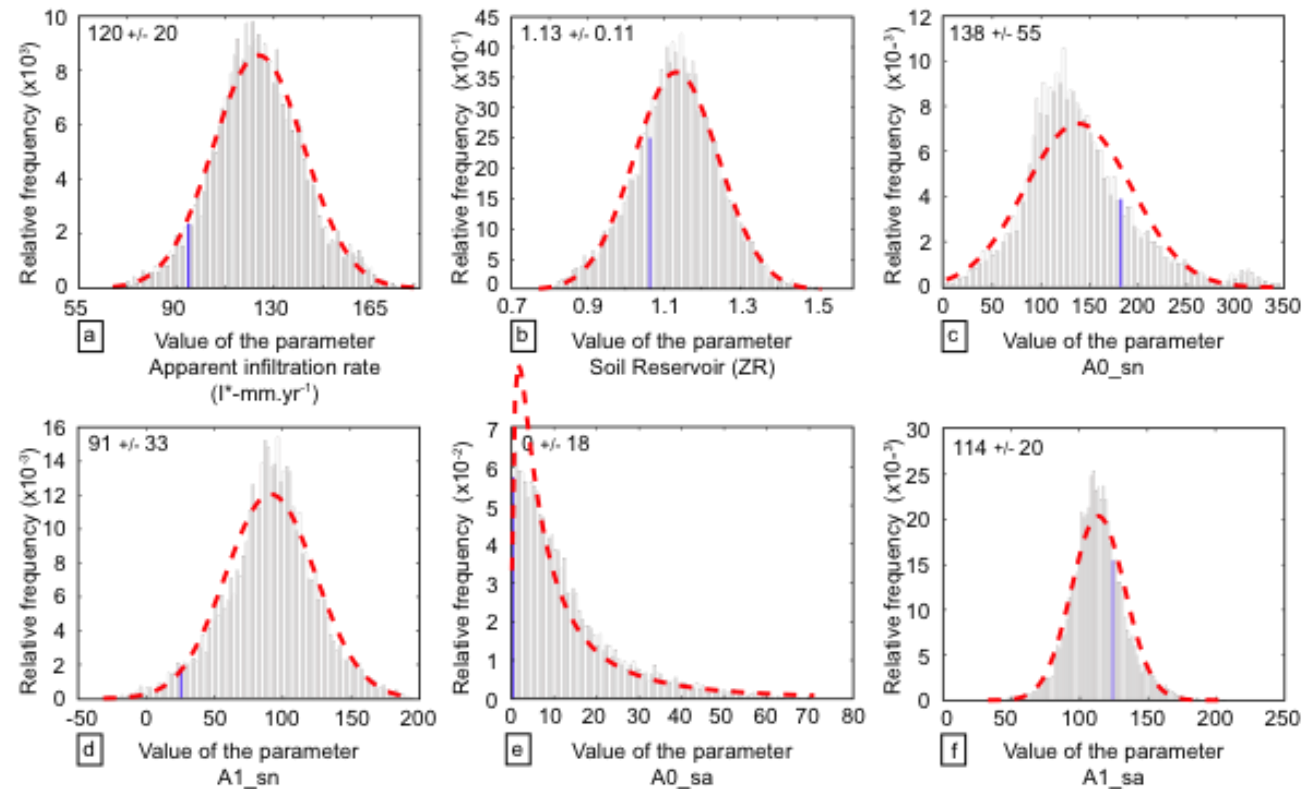
Jeu de paramètres 2



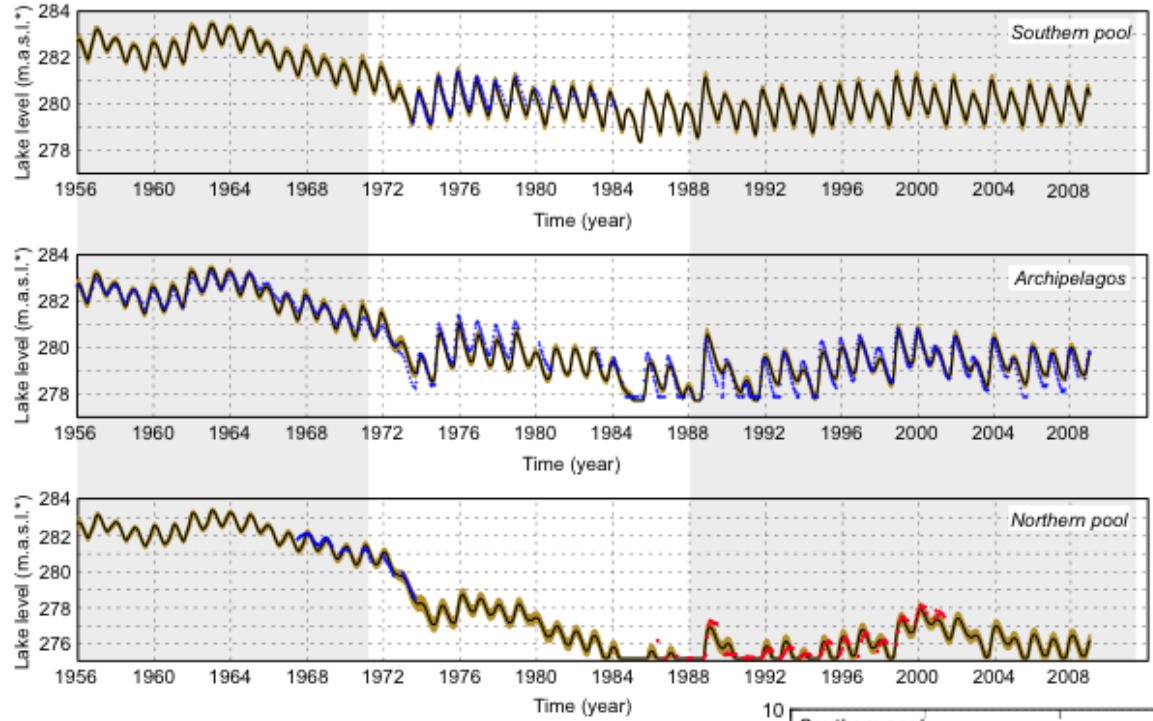
Convergence du modèle
et valeur seuil
d'acceptation des
paramètres



A posteriori PDF :
moyenne et erreur
standard sur chaque
paramètre du modèle



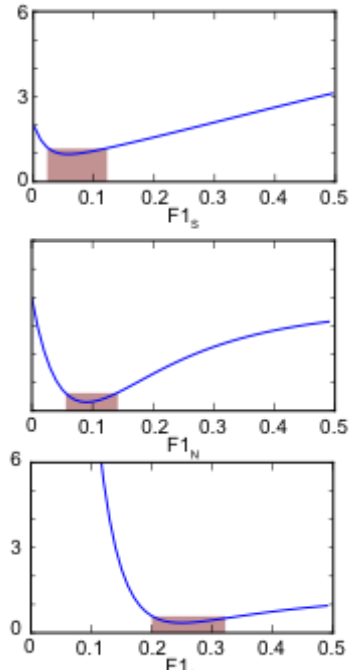
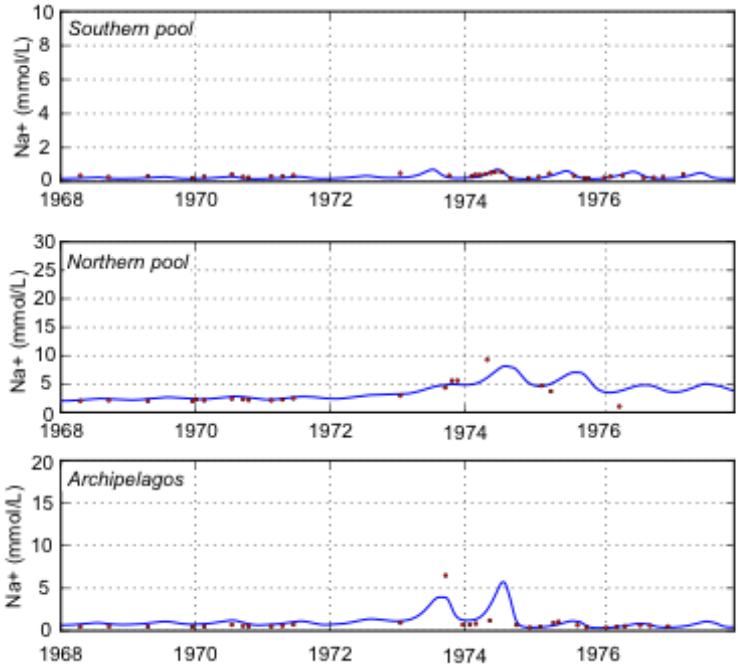
Résultats hydro/chimie avec les paramètres obtenus



- Sensibilité différente de chaque cuvette au paramètre d'infiltration
- Valeurs d'infiltration différente selon les cuvettes



Bonne corrélation entre simulations et observations hydrologiques et chimiques

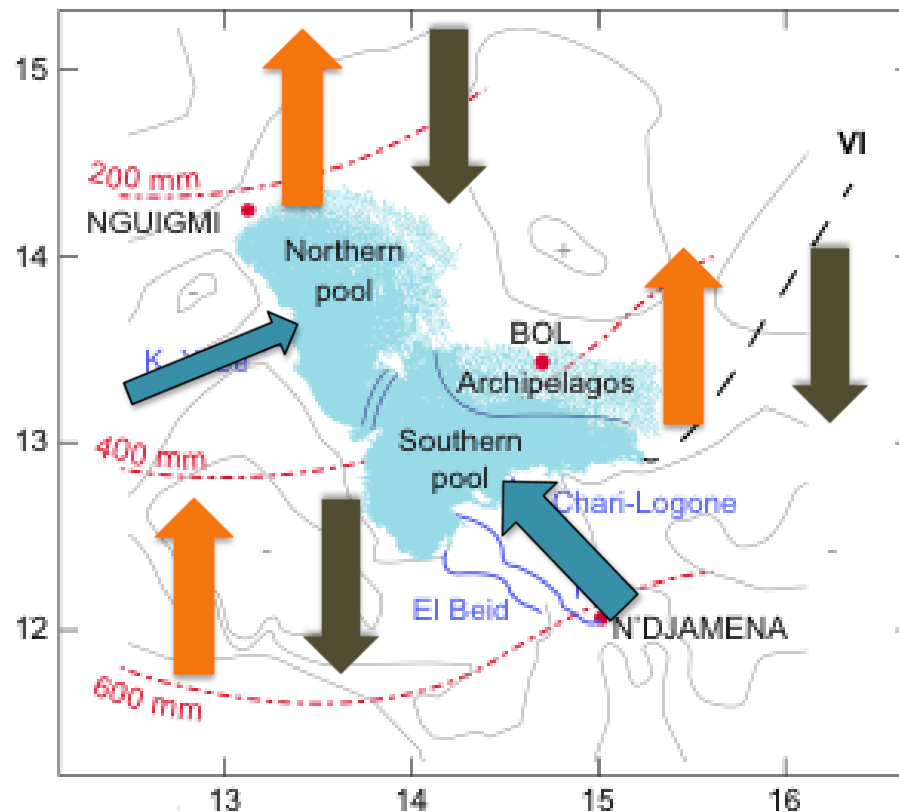


Intérêt : meilleure connaissance du bilan hydrique du lac et en particulier des valeurs
>> primordial pour la régulation chimique du lac
>> et pour l'alimentation en eau de l'aquifère quaternaire...

Cuvette Nord :

E=2320 mm/y

I=230 mm/y



Archipels :

E=1825 mm/y

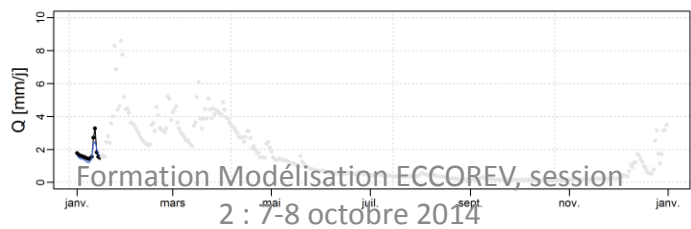
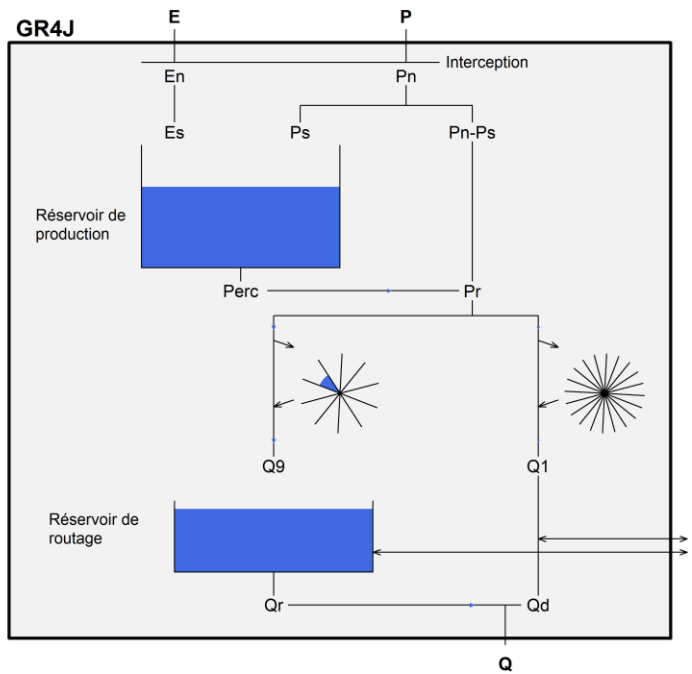
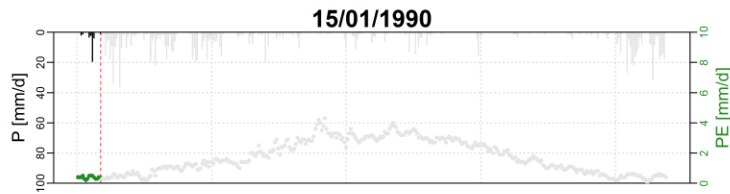
I= 611 mm/y

Cuvette Sud :

E=2068 mm/y

I= 132 mm/y

- Limite : nécessite les valeurs de débits en entrée
- >> limite son extrapolation dans le passé et le futur
 - >> couplage avec un modèle hydrologique Pluie-Débit ex: GR2M IRSTEA



Modélisation Hydrogéologique

Exemple:

Système Aquifères du Sahara Septentrional

Thèse de Jade Petersen (soutenue en 2014)

Aquifère Multi-couche 10⁶ km²

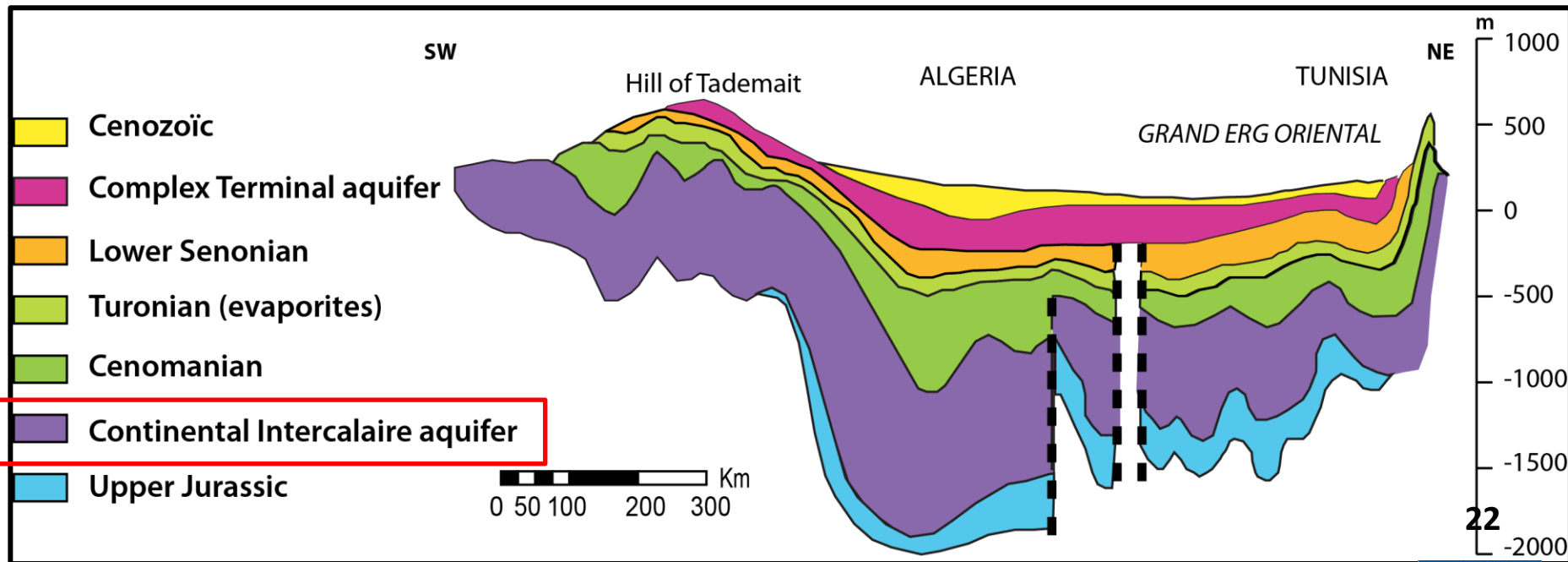
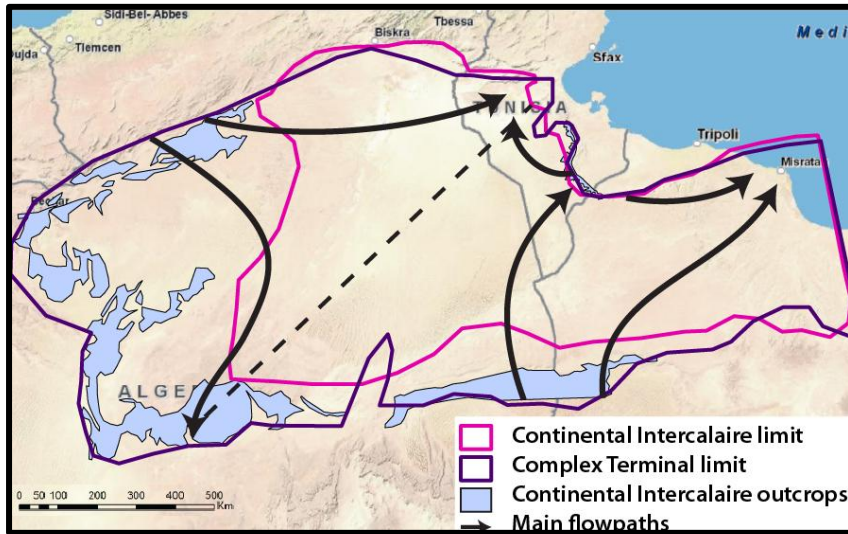
Réserves “fossiles” estimée:

31 000 km³

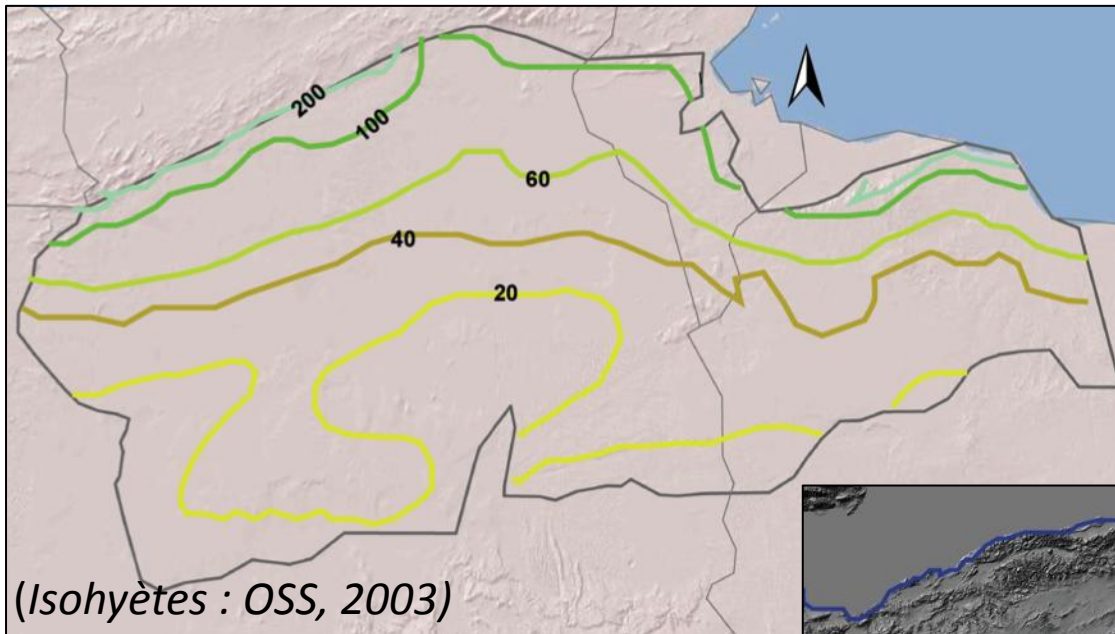
(Baba Sy, 2005)

coupe géologique

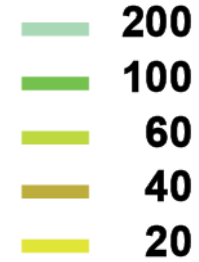
(Guendouz et Michelot, 2006)



Aride à Semi-aride



Précipitation
(mm an⁻¹)



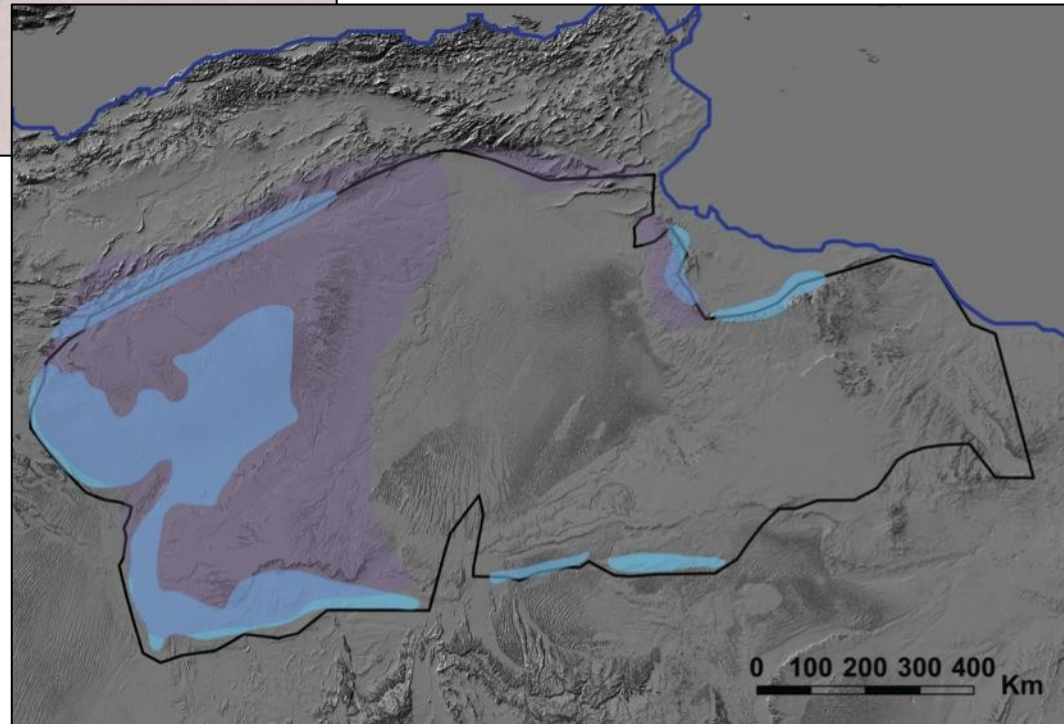
Recharge:



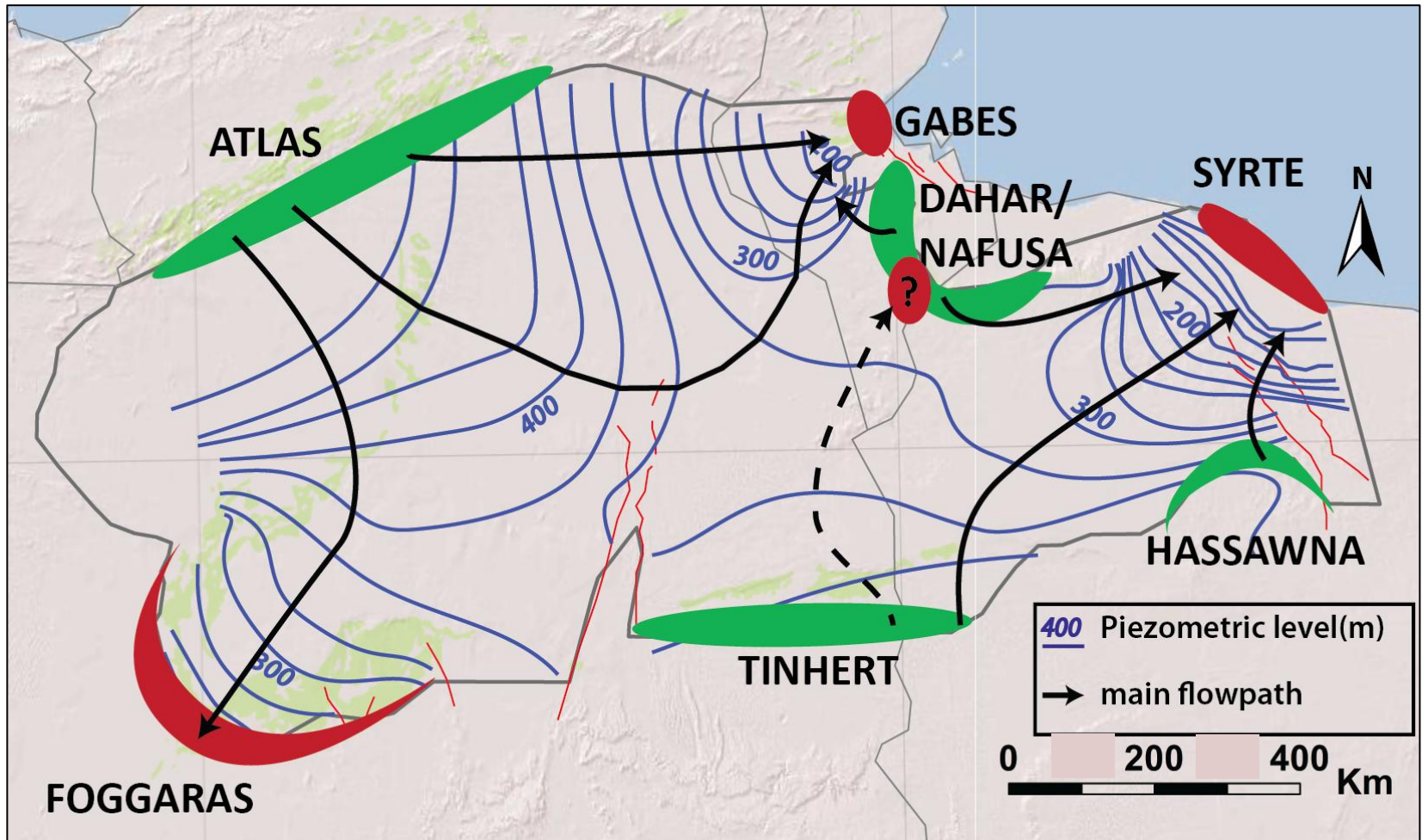
Infiltration directe



Ruissellement



Carte piézométrique de référence (1950) OSS, 2003 ~régime permanent avant intensification des pompages

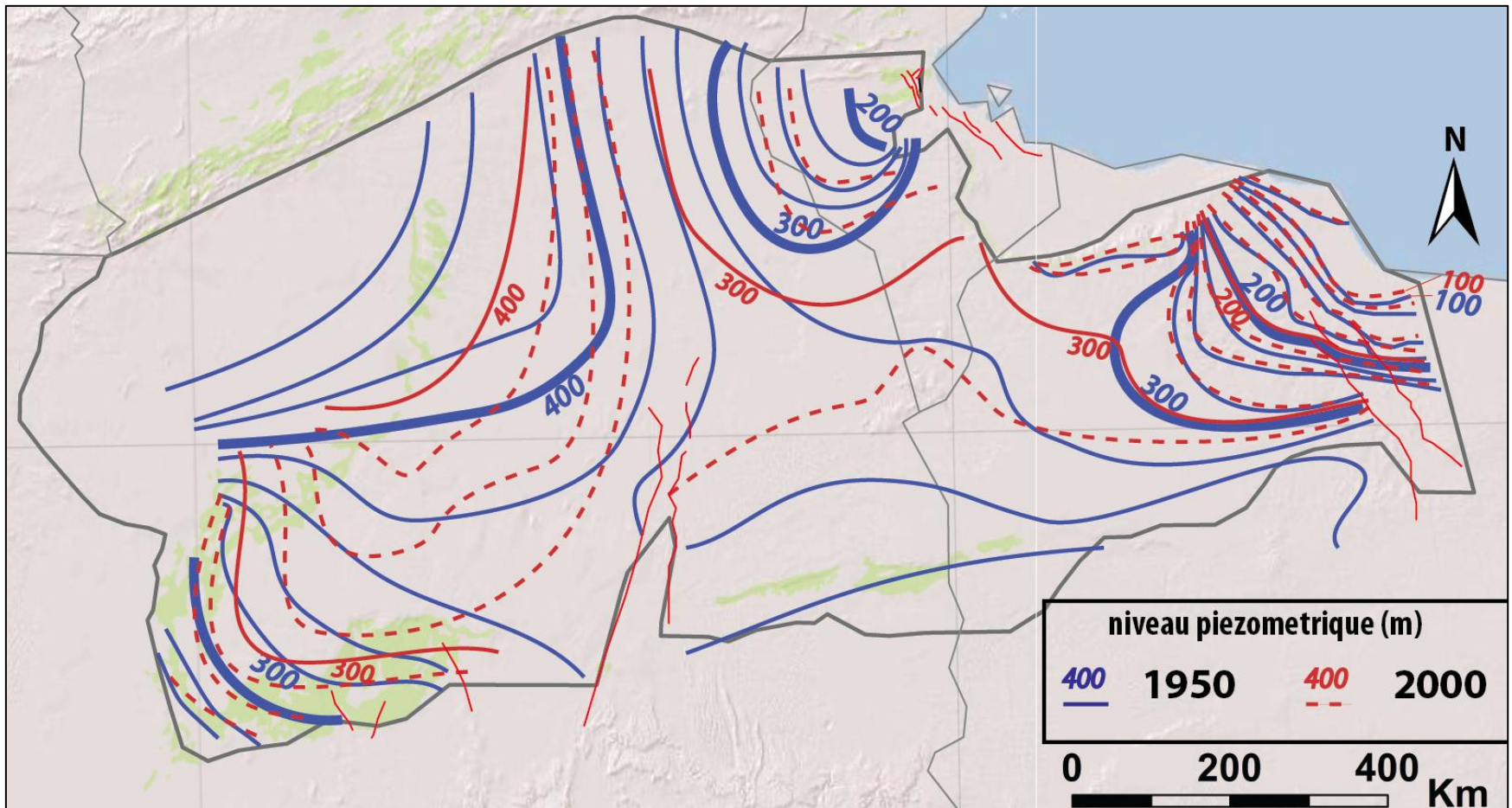


Zone de recharge



Zone éxutoire

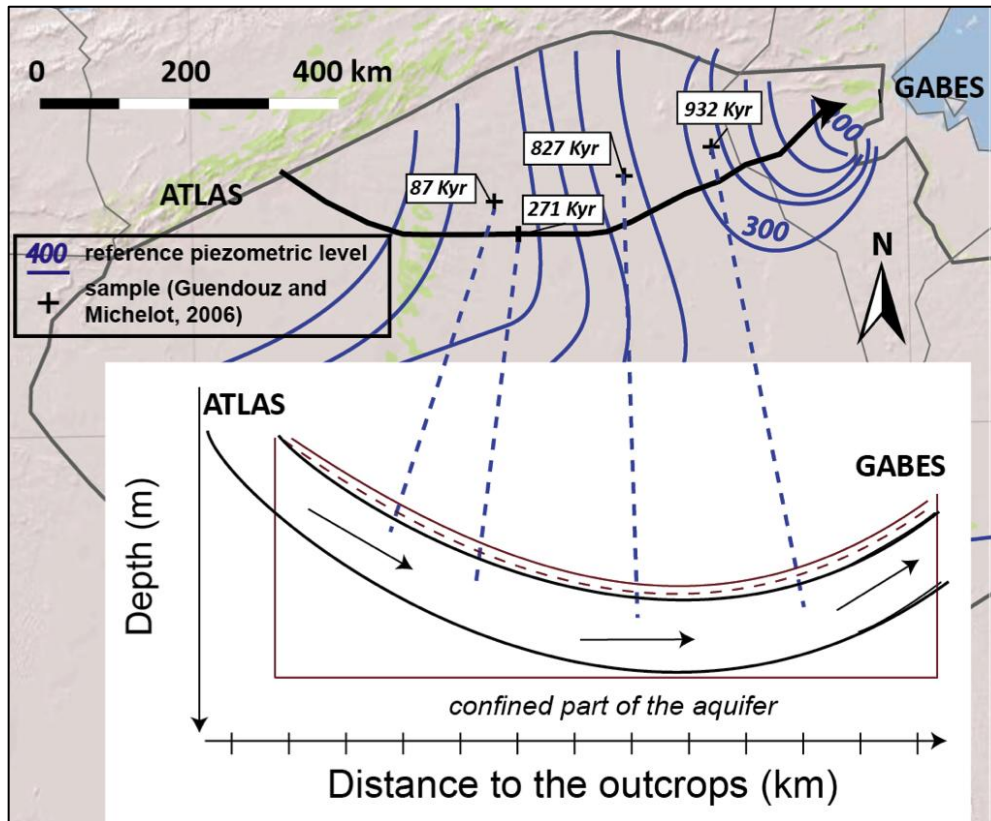
Carte Piézométrique (2000) d'après OSS, 2003



Déclin du niveau piézométrique
consommation 0,5 km³/an en 1950 à ~3km³/an en 2000)

Objectifs:

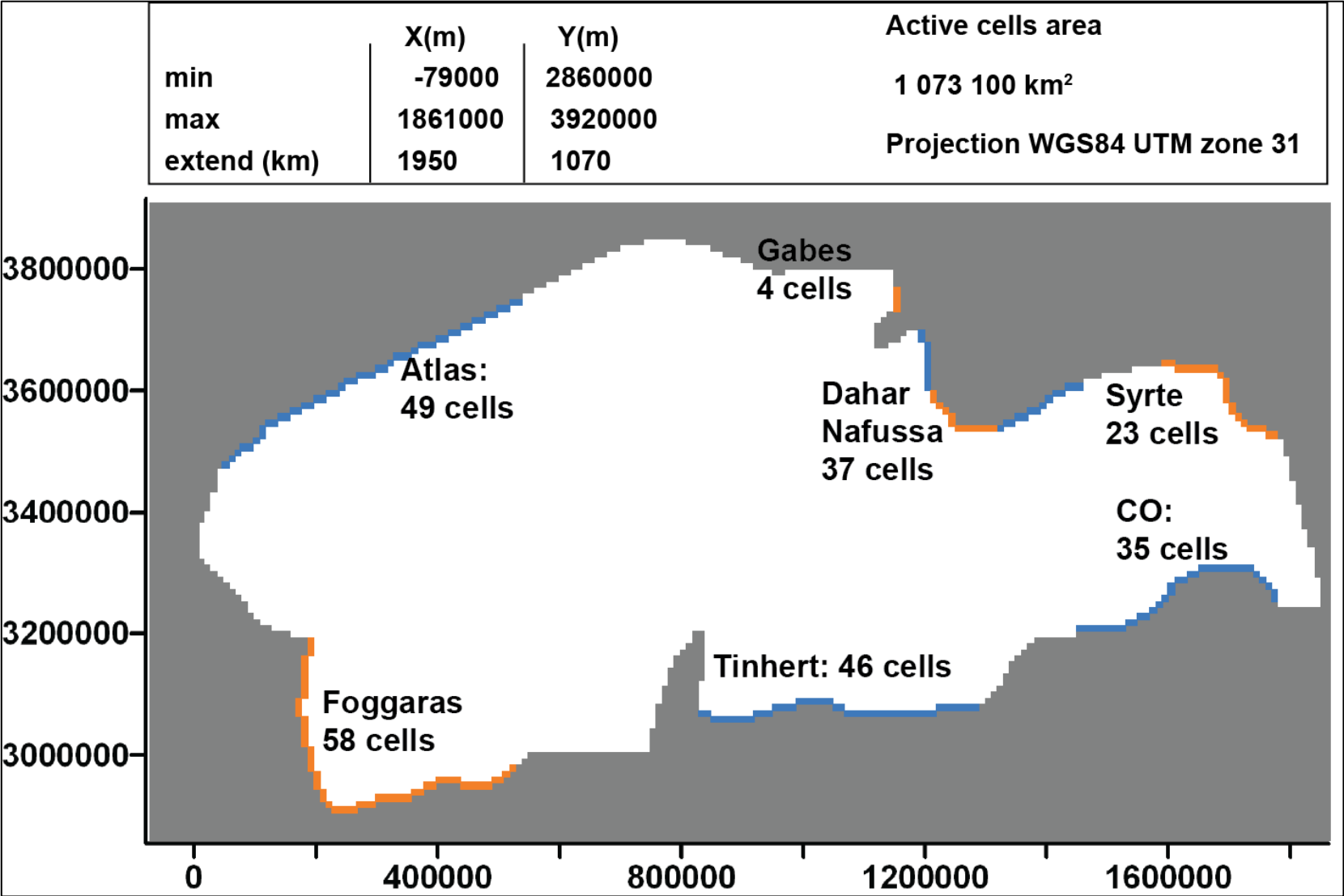
- 1-Empreinte passée (transitoire) sur le déclin des niveaux piézométriques actuels
- 2-Reproduire à l'aide d'un traceur « maison » ^{36}Cl l'évolution de la recharge au quaternaire



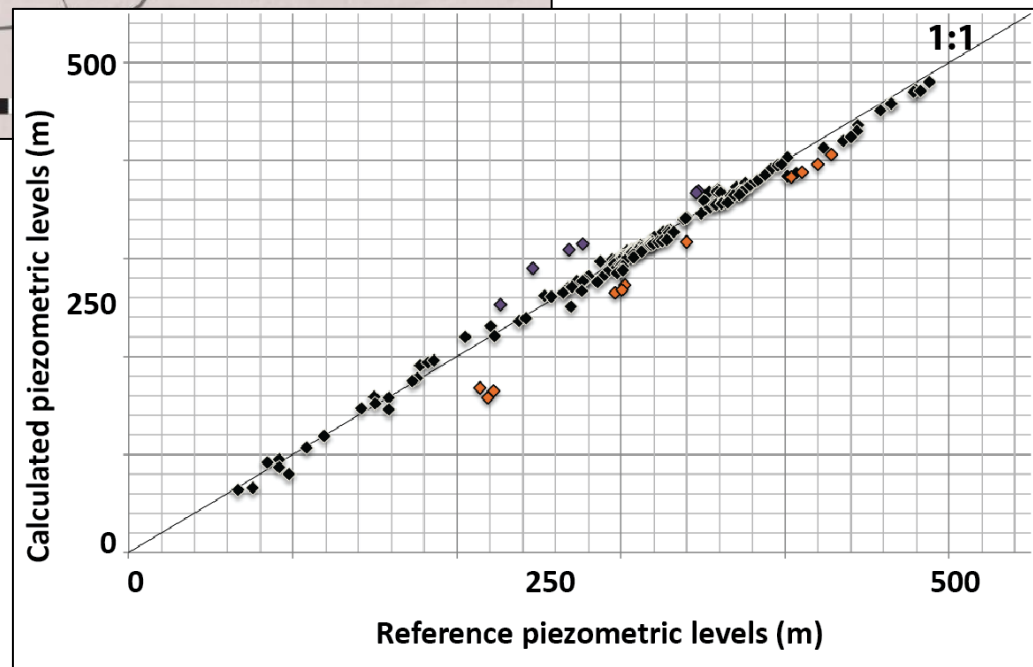
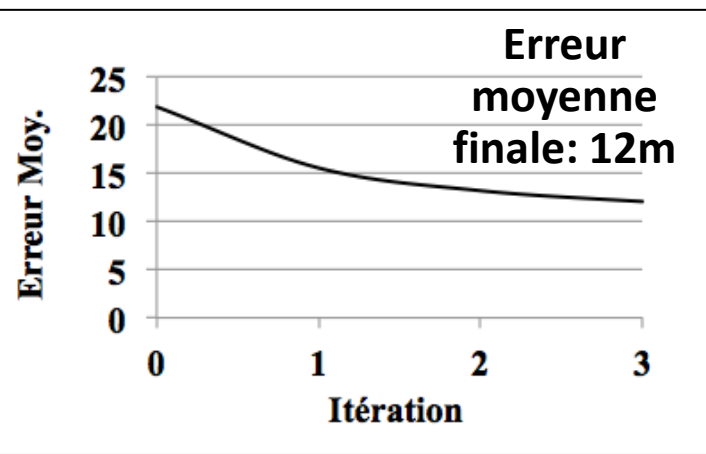
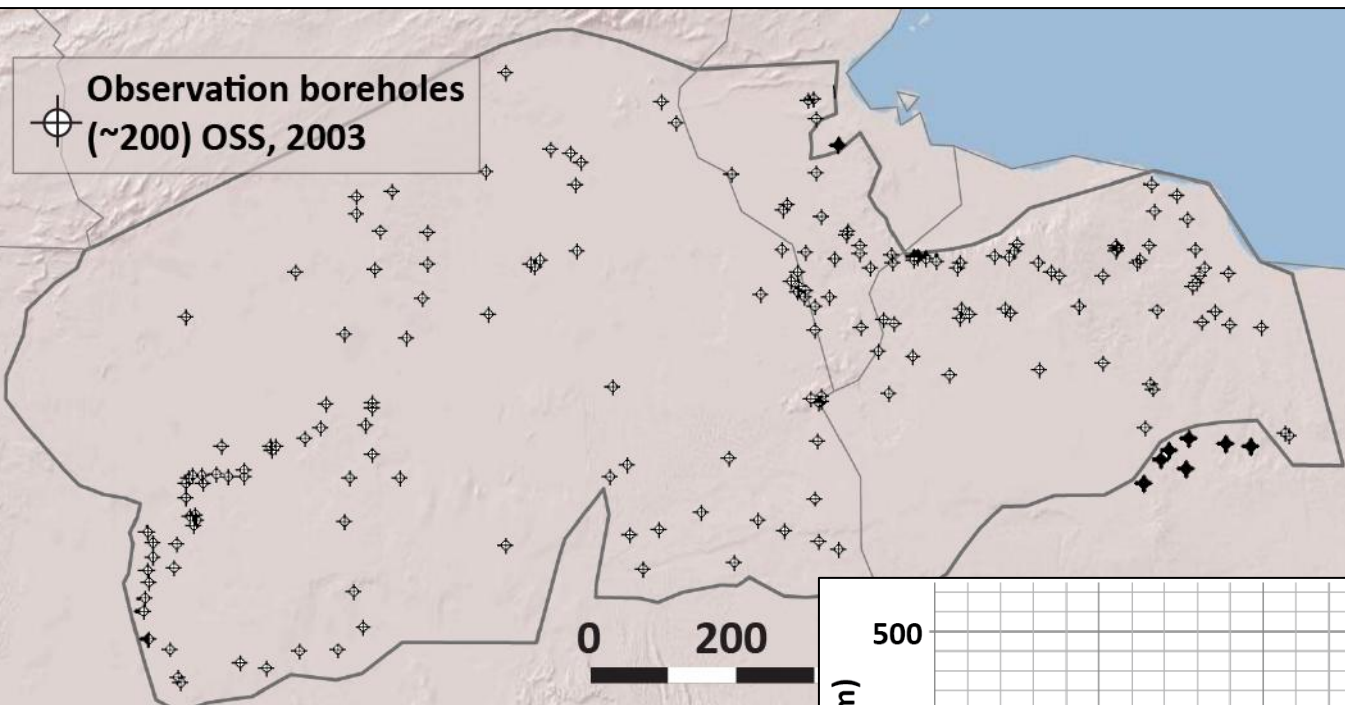
“ages” estimés des
eaux du Cl : maximum
1 million d’année
(Guendouz et Michelot, 2006)

***La distribution du ^{36}Cl très
fortement impactée par
l’évolution temporelle des
vitesses d’écoulement (donc de
la Recharge!)***

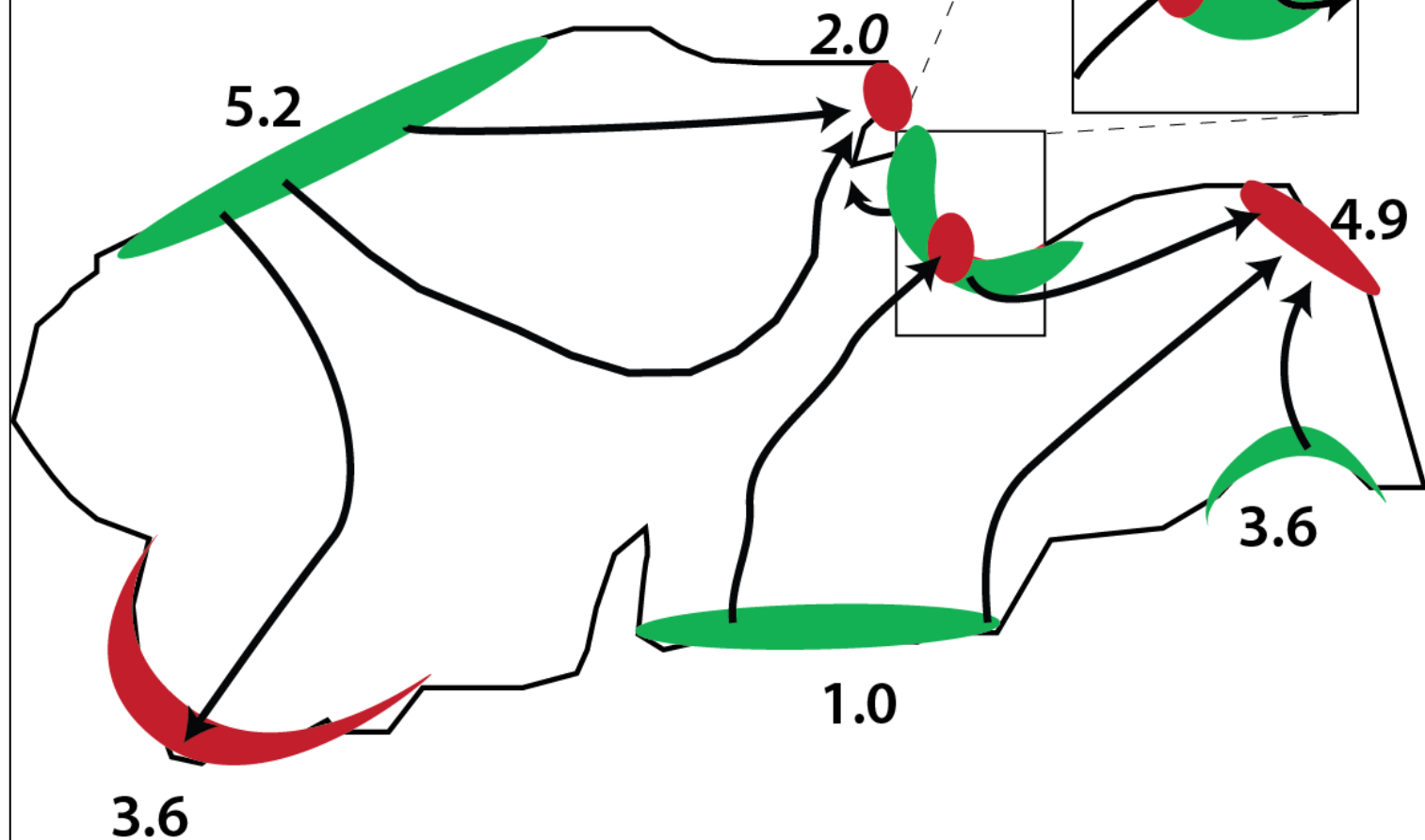
Construction d'un modèle écoulement (puis –transport) Processing Modflow: géométrie (épaisseurs), extension et les conditions aux limites . Environ 10000 mailles de calcul



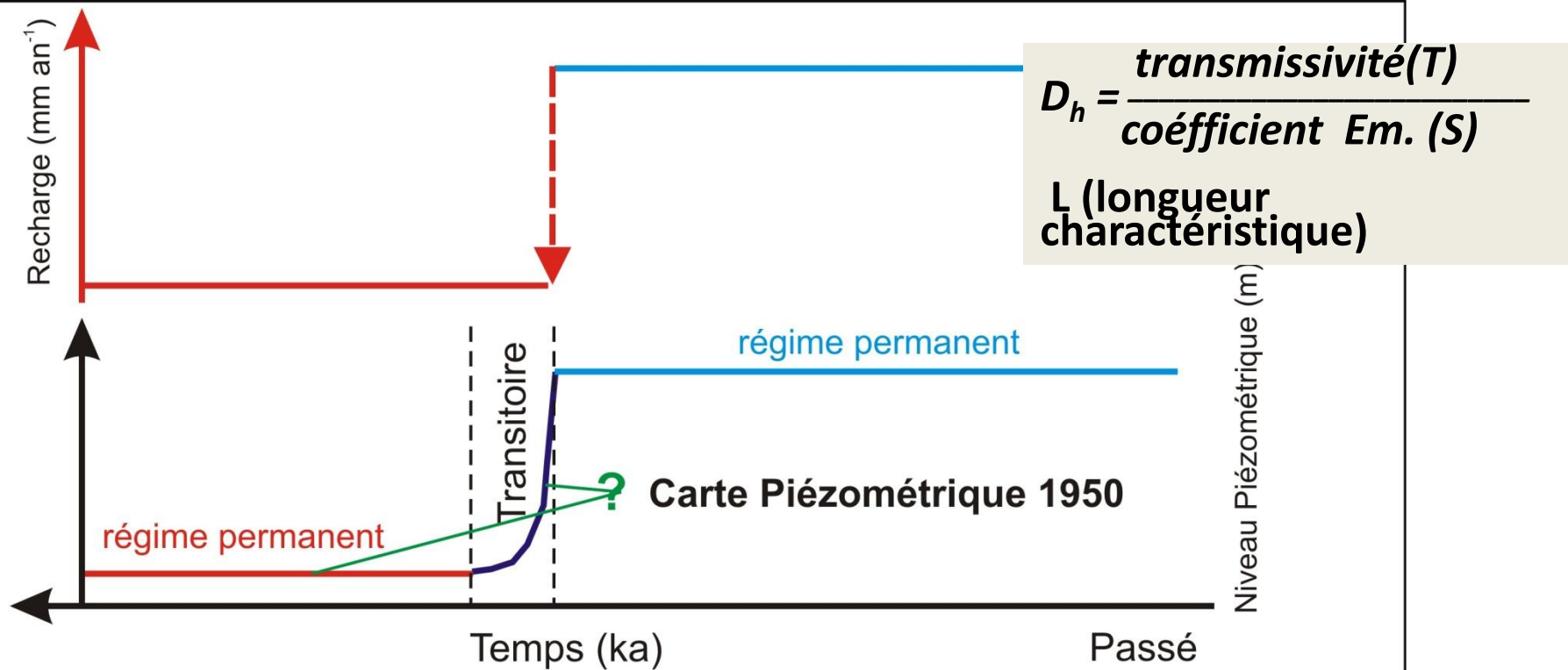
**Etape 1: inversion
des perméabilités
sur la base de la
piézométrie de 1950
~régime permanent**



flux calculés en régime
permanent en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$



Effet transitoire (héritage de l'humide Africain Holocène)?

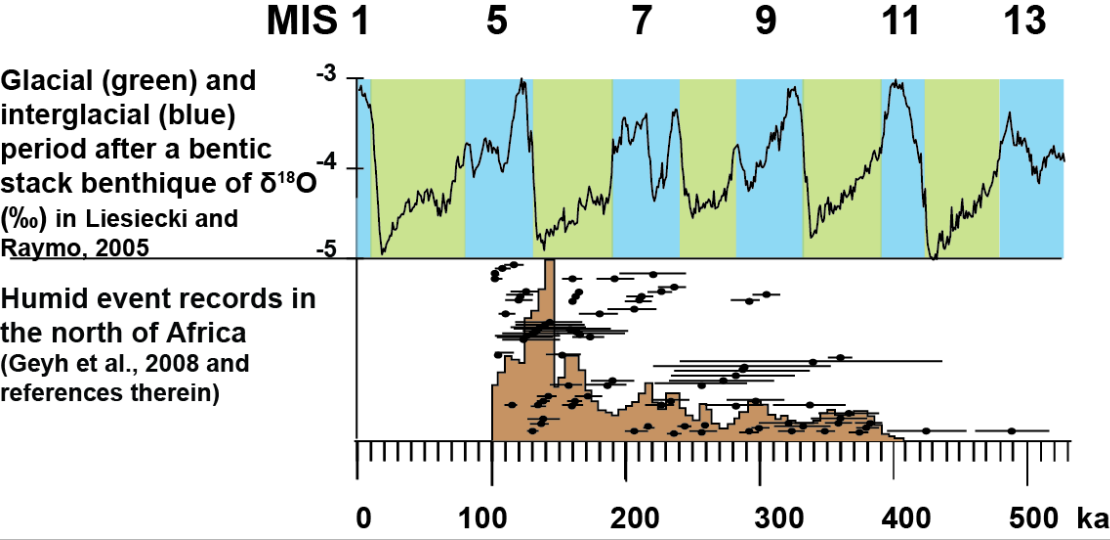


Après perturbation, les niveaux piézométriques s'équilibrent en ~ 3 le temps caractéristique (τ) de l'aquifère (Rousseau-Gueutin et al., WRR, 2013)

Application au SASS:

$$\tau = \frac{L^2}{D_h} \approx 800 \text{ a} ; 3\tau \approx 2400 \text{ a}$$

NON! Déclin piézo.
↗ pompage après 1950

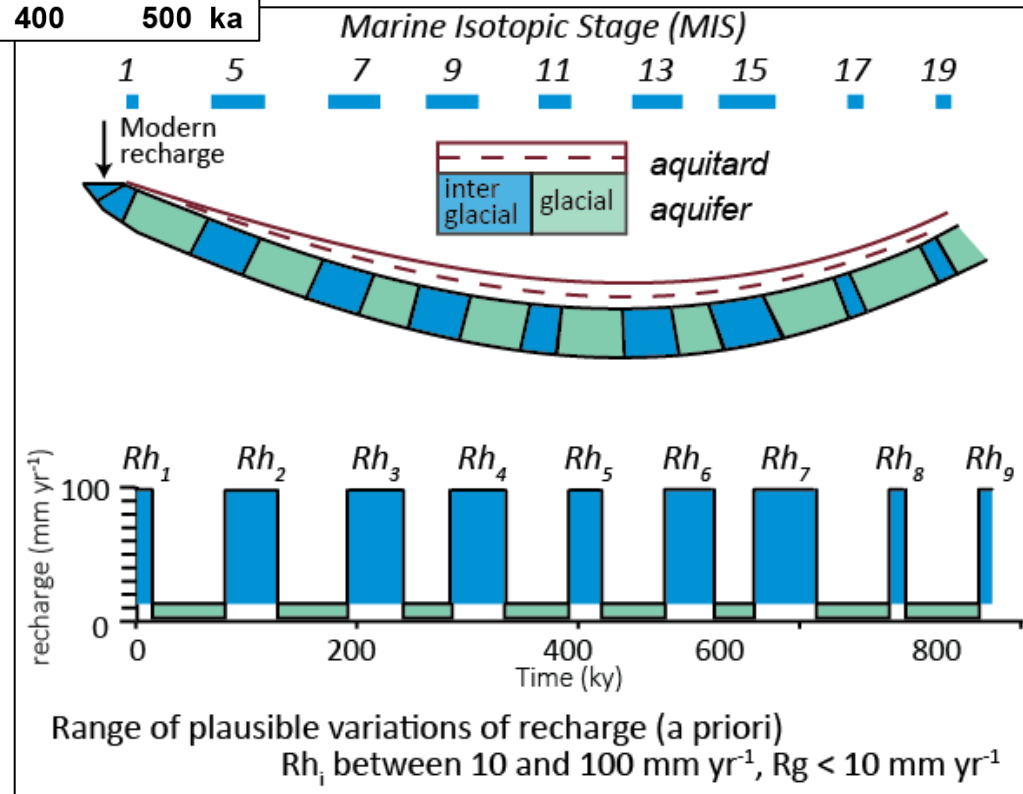


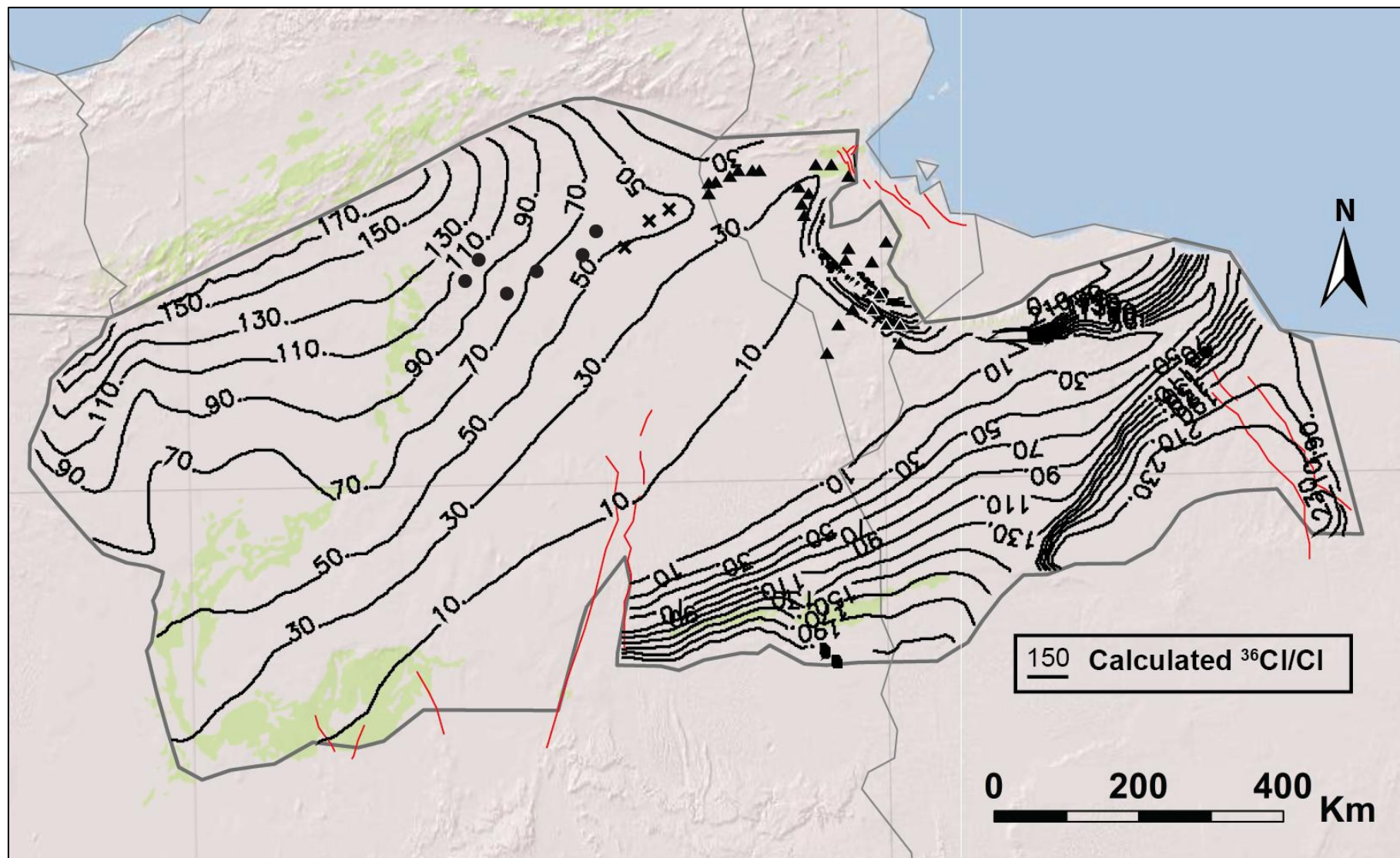
Sur le SASS,
le niveau piézométrique pas un bon « traceur » des variations climatiques passées (recharge)
Quid du ^{36}Cl ?

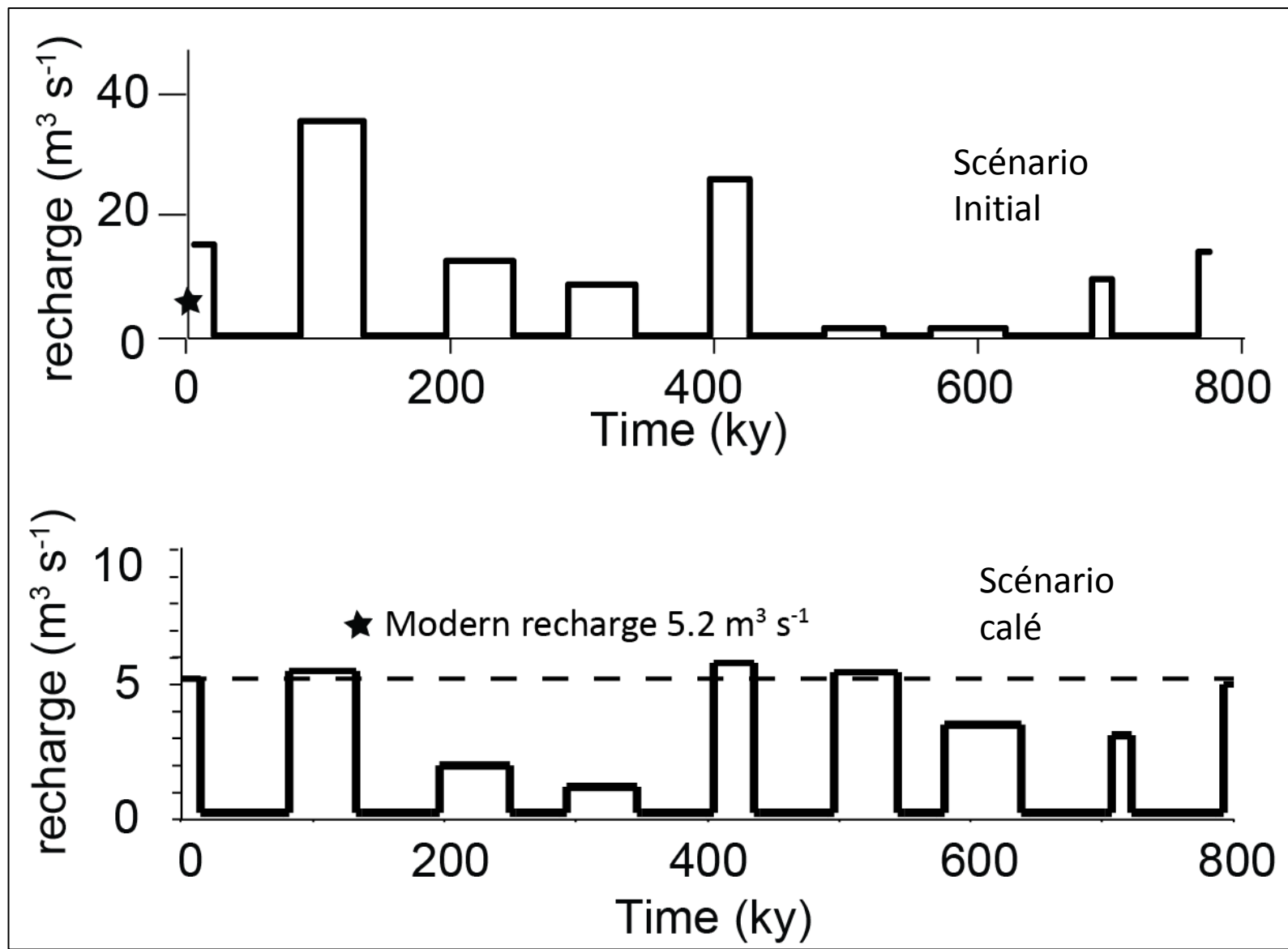


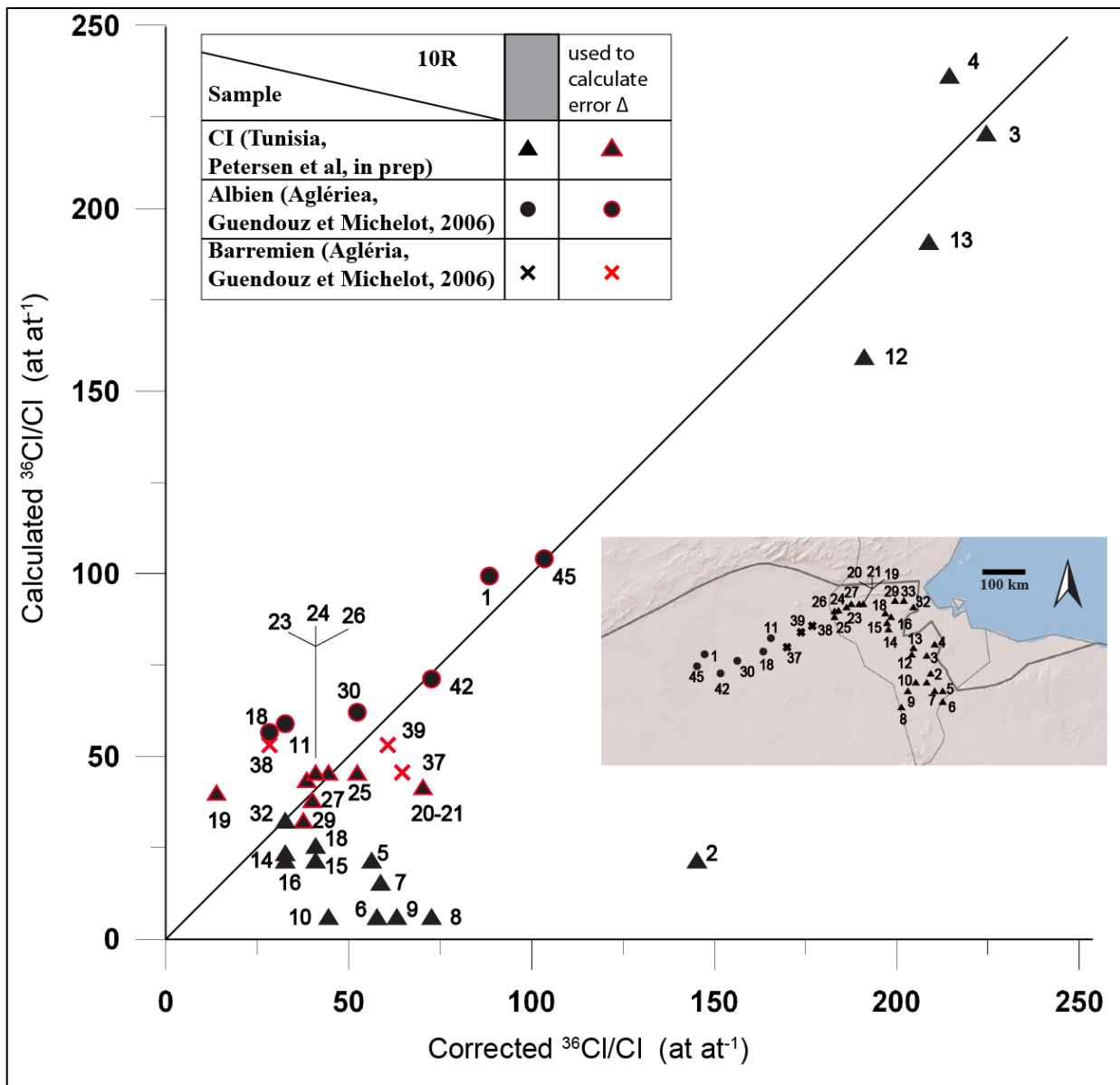
Passage du modèle 3D en transitoire (scenario climatique) + transport de masse:

10 paramètres à caler, $9R_{hi}+R_g$









Perspectives

- affiner l'analyse (introduire des couches de porosité contrastées CI)
- acquérir des données d ^{36}Cl proche de la zone Atlasienne

Construire et faire tourner un modèle peut être « grisant » mais...

...avec la réflexion suivante avant de concevoir le modèle :

« Ce n'est donc pas au modèle que l'on devrait faire confiance mais à l'homme derrière le modèle, à son expérience et à sa capacité à représenter par le modèle ce qu'il a perçu de la réalité représentée »

G de Marsily