

Cycle hydrologique et climat, relations avec les eaux souterraines

Agnès DUCHARNE

METIS-IPSL, Sorbonne Université, CNRS, Paris, France

Avec de nombreux collègues de l'IPSL, du CNRM, et de Taiwan (NTU)
dans le cadre du projet ANR IGEM
« Impact of Groundwater in Earth System Models »



- Qu'entend-on par eaux souterraines ?
- Comment les étudie-t-on ?
- Liens avec les débits et les ressources en eau
- Influence sur l'évapotranspiration
- Liens avec le climat

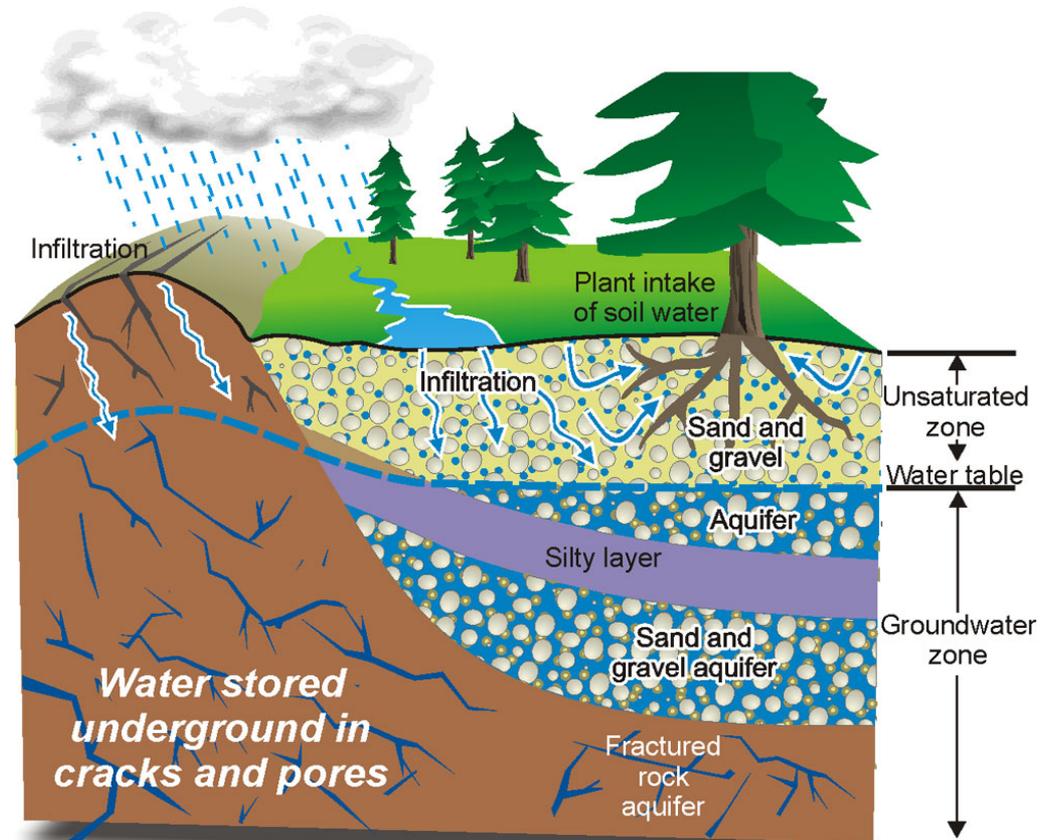
- **Qu'entend-on par eaux souterraines ?**
- Comment les étudie-t-on ?
- Liens avec les débits et les ressources en eau
- Influence sur l'évapotranspiration
- Liens avec le climat



Source karstique
de la Fontaine de Vaucluse

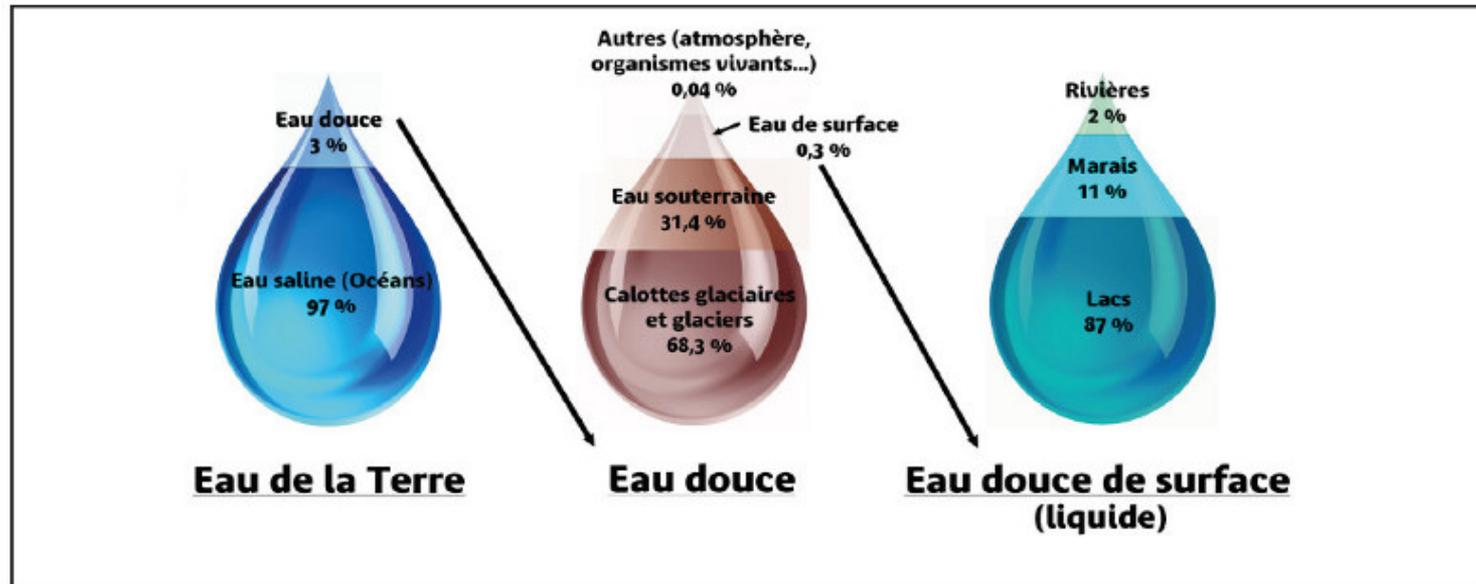
Quelques définitions

- Zone non saturée
- Zone saturée
- Nappe phréatique
- Aquifère
- Eaux souterraines
- Humidité du sol



Quelques chiffres

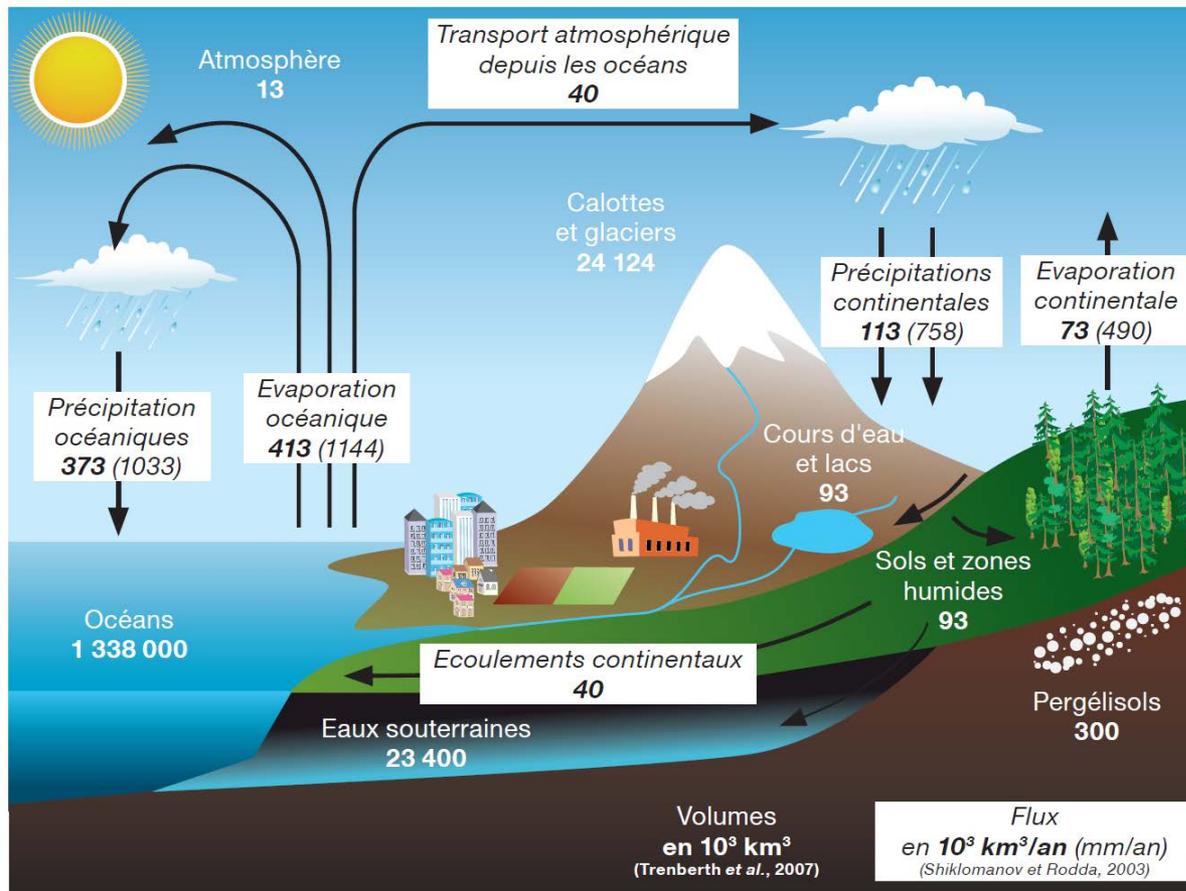
Répartition de l'eau à la surface de la Terre



Source : Gleick, 1996

- Eau utilisable = rivières et lacs et une part des eaux souterraines
- 25% des prélèvements en eaux douce sont issues des eaux souterraines

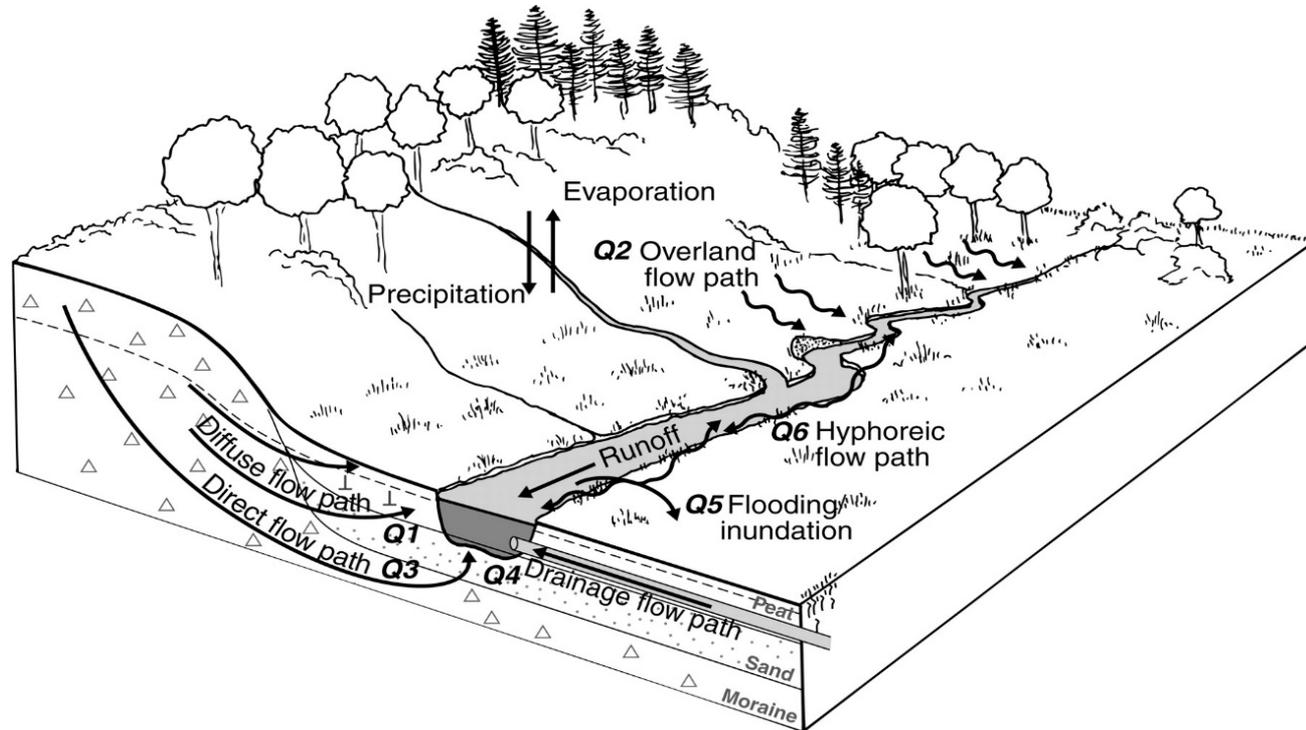
Les eaux souterraines coulent



Flux verticaux dans la zone non saturée vs. horizontaux dans la zone saturée :

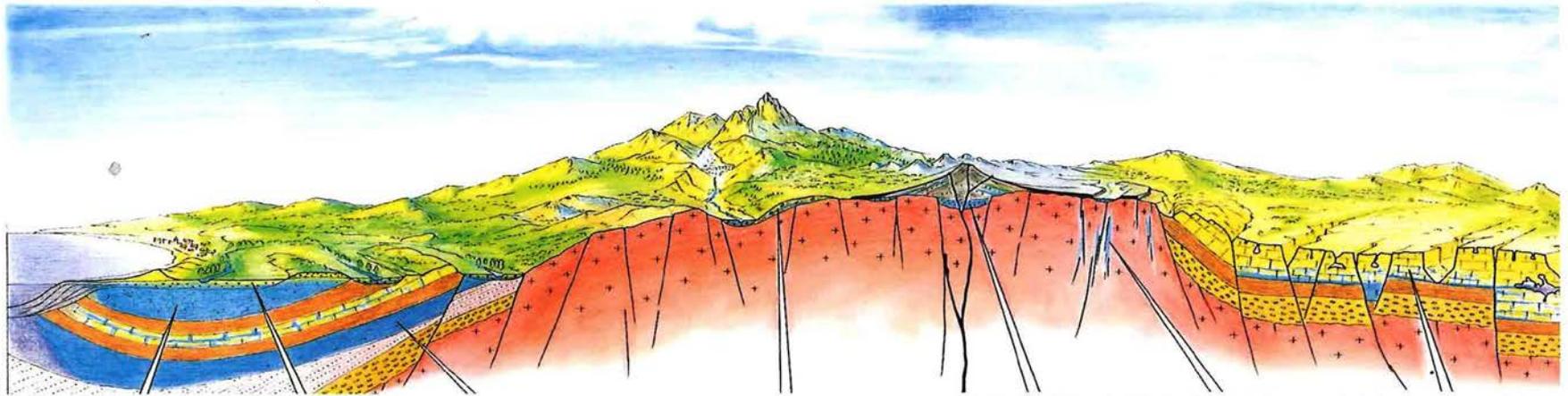
- Permet l'alimentation des cours d'eau en absence de pluie (débit de base)
- Les eaux souterraines sont une ressource renouvelable (sauf exception)

Les eaux souterraines coulent

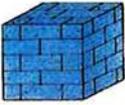
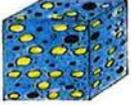
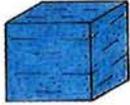
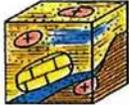


Photographs from Fan et al. 2019, WRR

Grande hétérogénéité de structure



© J.-J. Collin, Les eaux souterraines

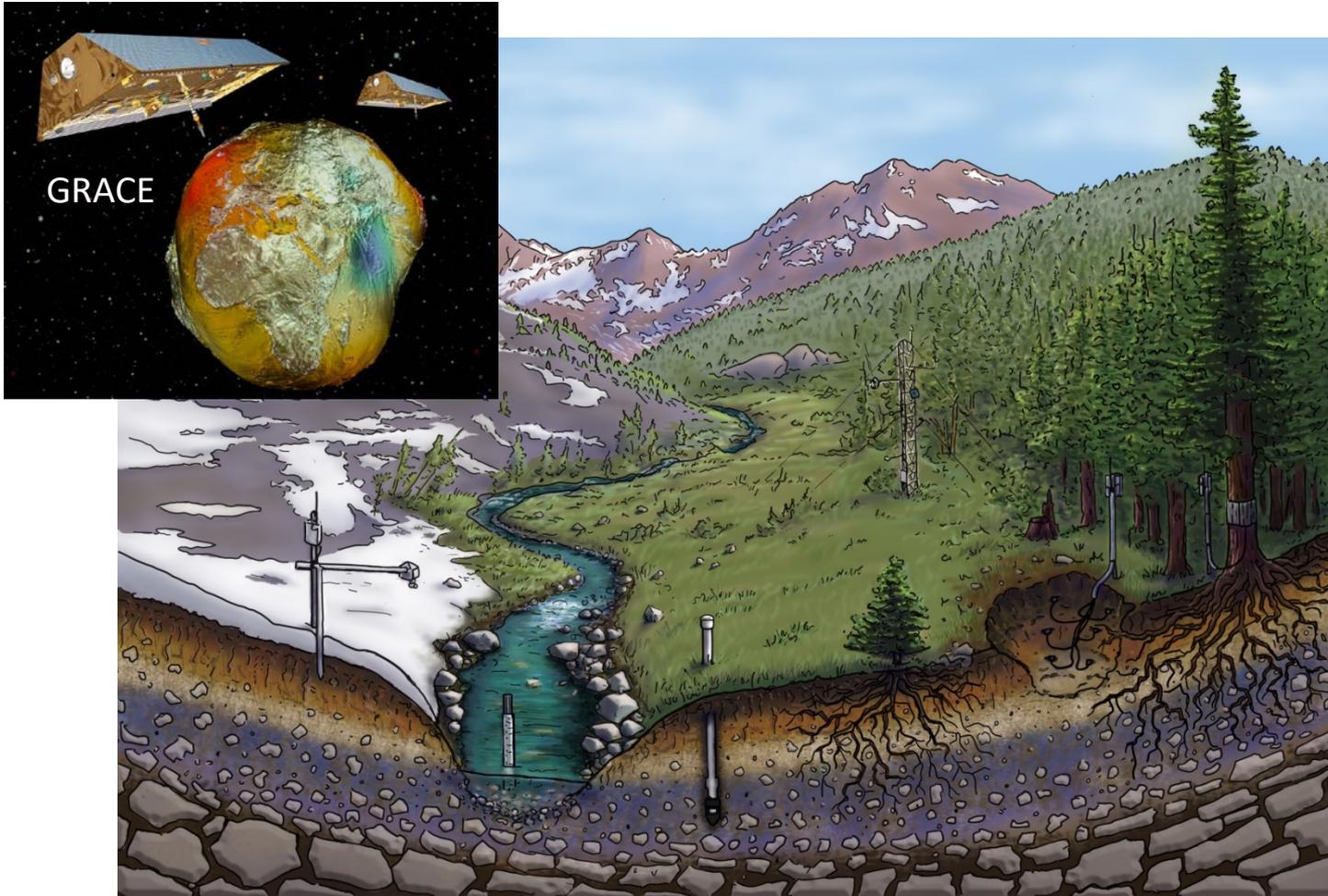
| | | | | | | |
|---|---|--|--|---|--|--|
| <p>Aquifères de roches sédimentaires (libres)</p>  <p>Calcaire, craie, grès</p> <p>Débit : moyen à élevé</p> | <p>Sables et alluvions des vallées</p>  <p>Graviers et sables</p> <p>Débit : bon à élevé</p> | <p>Aquifères sédimentaires profonds (captifs)</p>  <p>Formations sédimentaires poreuses Calcaires, craie, grès</p> <p>Débit : bon à élevé</p> | <p>Dépôts glaciaires (moraines)</p>  <p>Association de blocs, argiles, graviers, sables</p> <p>Débit : très variable</p> | <p>Aquifères volcaniques</p>  <p>Laves et scories</p> <p>Débit : excellent dans les scories, faible dans les laves</p> | <p>Roches dures fissurées</p>  <p>Fractures dans le granite ou autres roches cristallines</p> <p>Débit : faible à moyen</p> | <p>Aquifères karstiques</p>  <p>Cavités dans le calcaire compact</p> <p>Débit : très variable</p> |
|---|---|--|--|---|--|--|

←—————→
Aquifères les plus productifs

- Qu'entend-on par eaux souterraines ?
- **Comment les étudie-t-on ?**
- Liens avec les débits et les ressources en eau
- Influence sur l'évapotranspiration
- Liens avec le climat



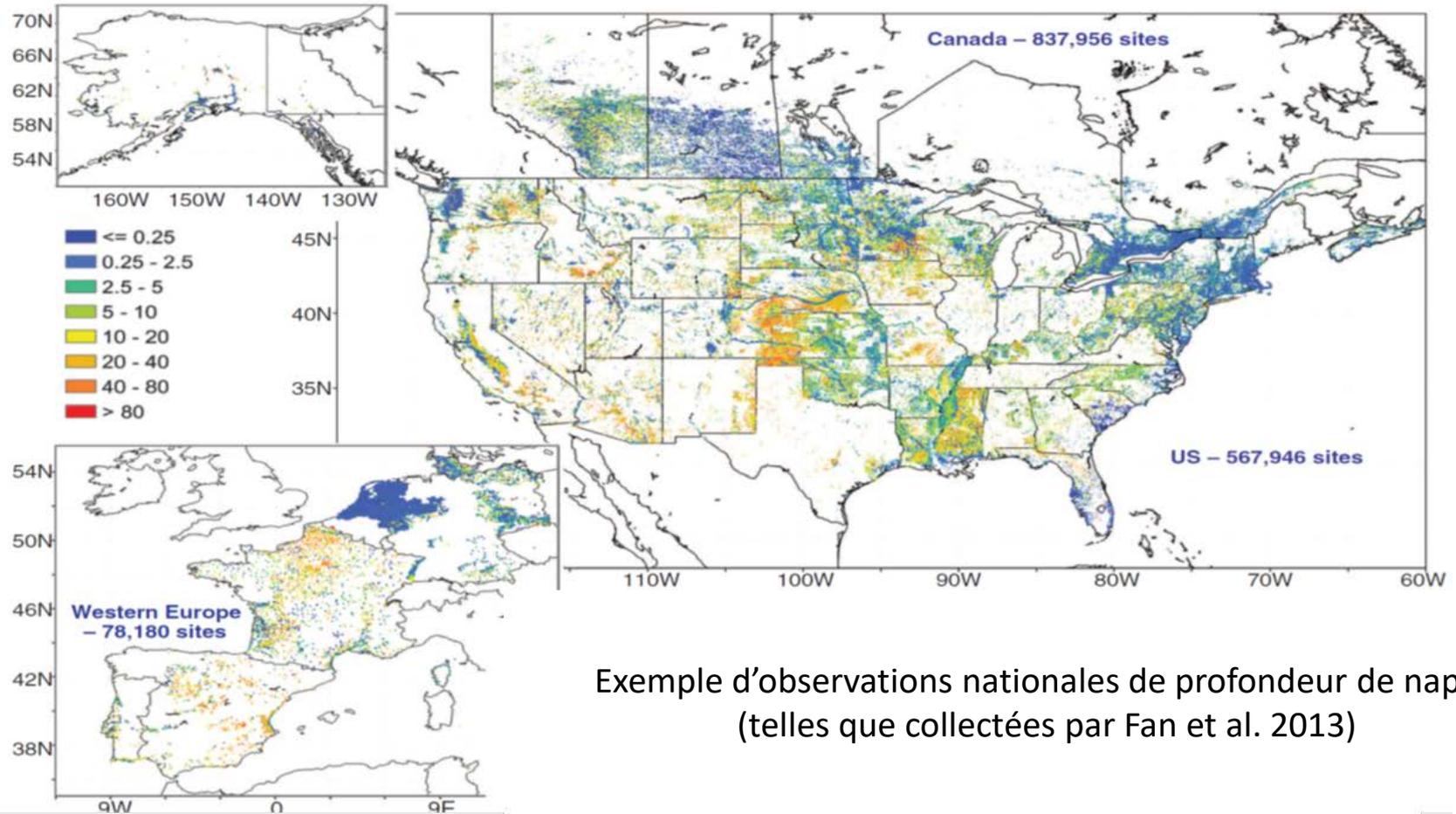
Comment étudie-t-on les eaux souterraines ?



L'observation in situ (hydrique, chimique, géologique) ou satellitaire (gravimétrie) n'offre qu'une vision très partielle

Comment étudie-t-on les eaux souterraines ?

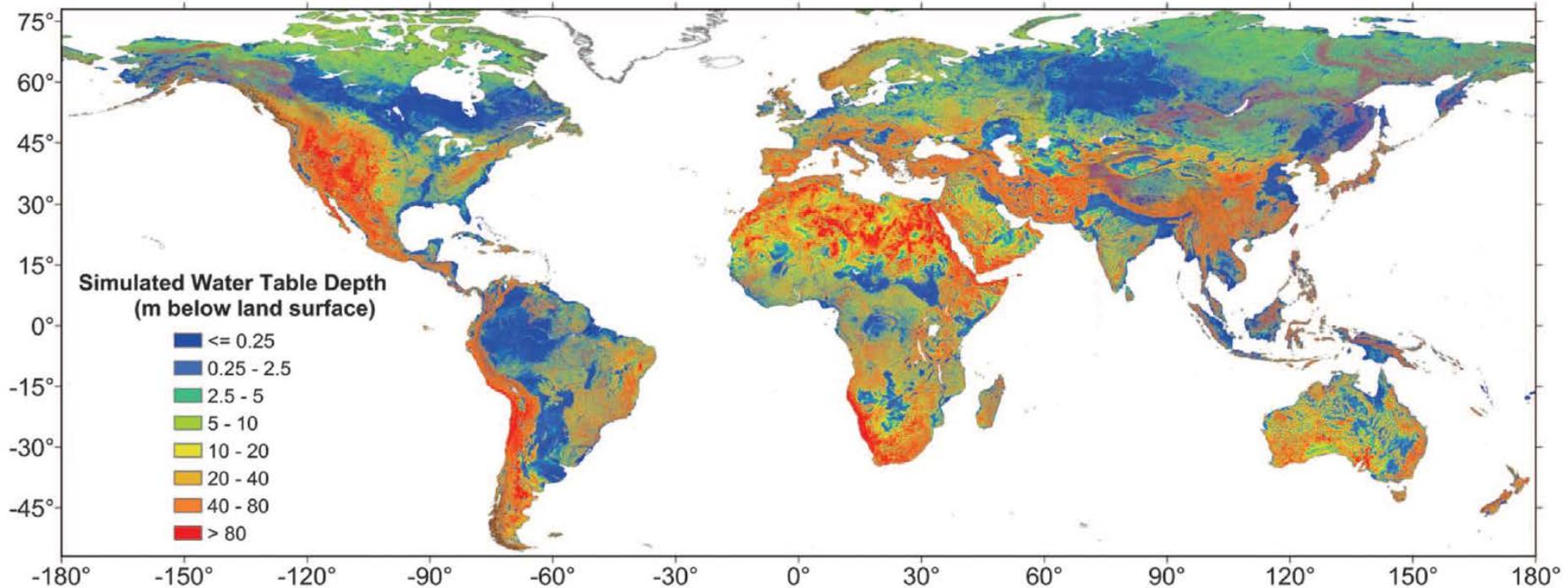
La modélisation permet de combler les lacunes des observations
et de tester des hypothèses de fonctionnement



Exemple d'observations nationales de profondeur de nappe
(telles que collectées par Fan et al. 2013)

Comment étudie-t-on les eaux souterraines ?

La modélisation permet de combler les lacunes des observations
et de tester des hypothèses de fonctionnement



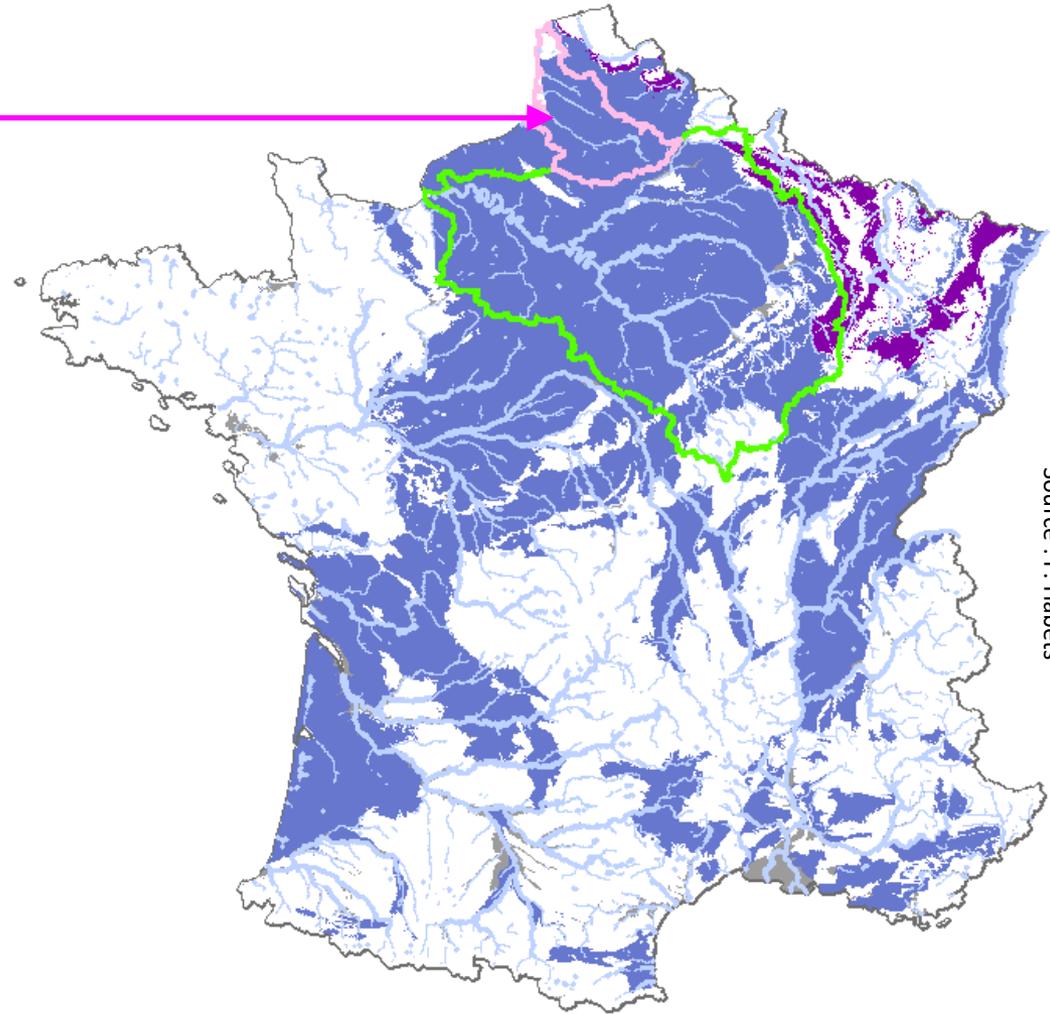
Simulation de la profondeur moyenne des nappes phréatiques, à la résolution de 1km,
avec un modèle 2D calibré par des observations (Fan et al., 2013)

- Qu'entend-on par eaux souterraines ?
- Comment les étudie-t-on ?
- **Liens avec les débits et les ressources en eau**
- Influence sur l'évapotranspiration
- Liens avec le climat



Le bassin versant de la Somme

- Surface @ Abbeville = 5,560 km²
- Dans la formation aquifère de la Craie
 - Alimente 90% du débit (BRGM)
 - Nappe libre
 - Profondeur moyenne = 40 m

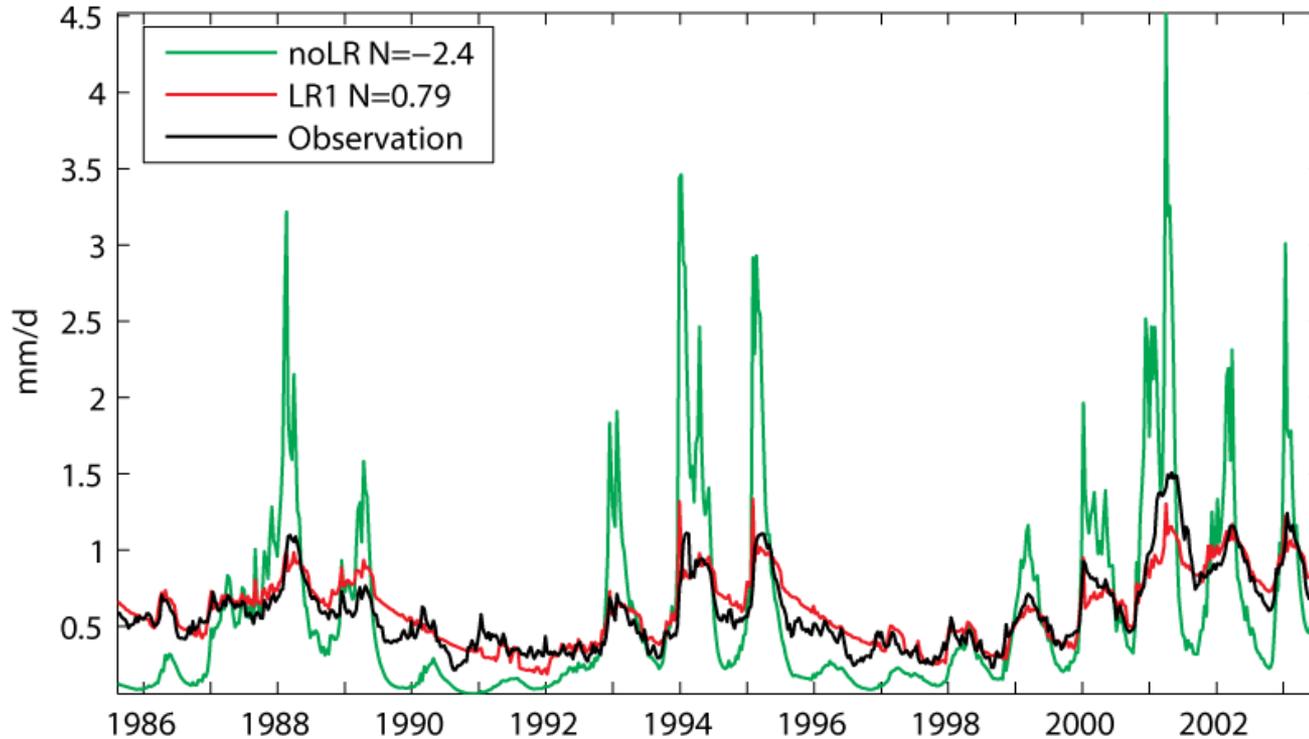


Source : F. Habets

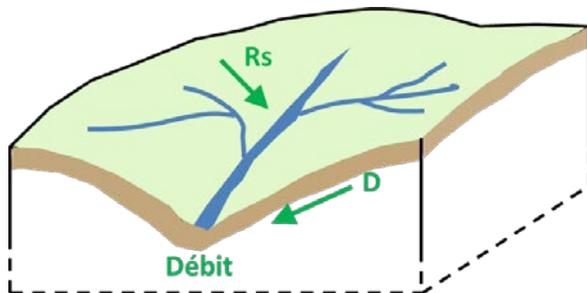
Principales formations aquifères en France

Effet tampon des nappes sur les débits

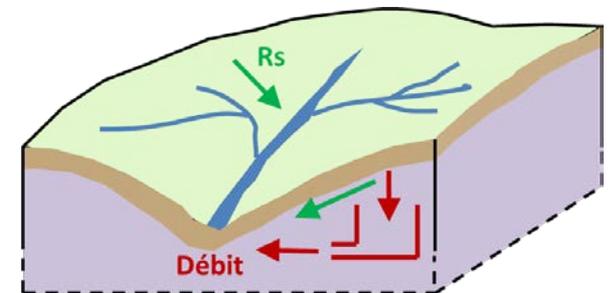
Débit à Abbeville



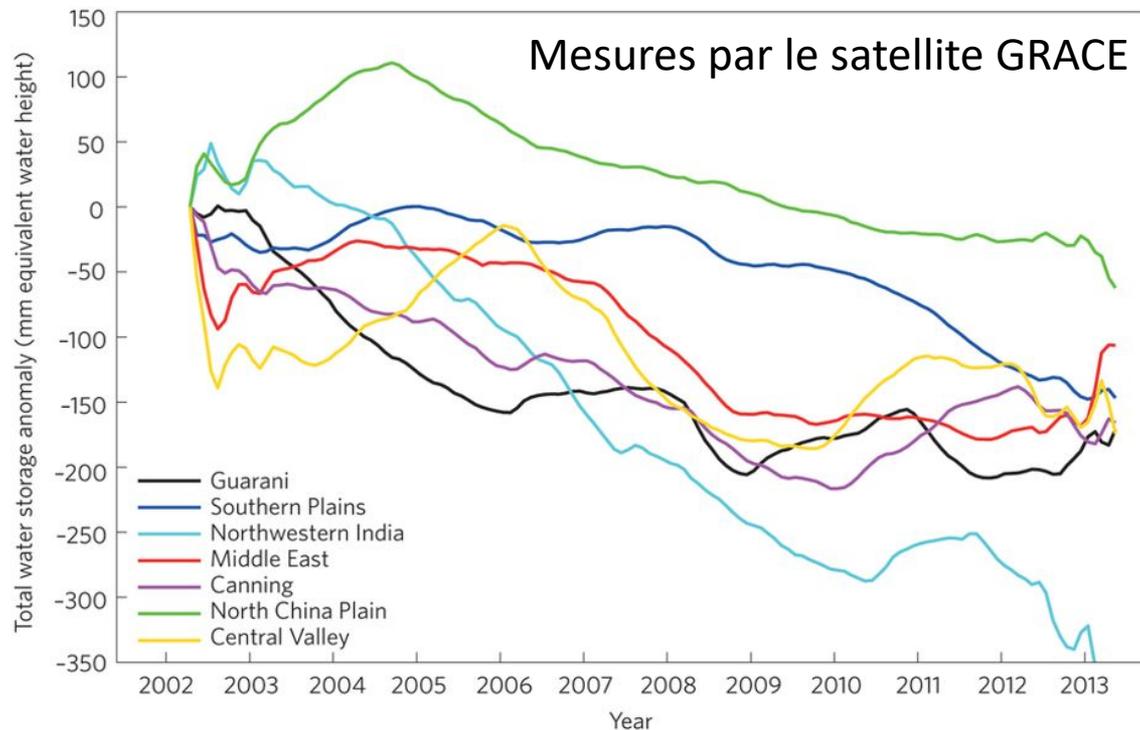
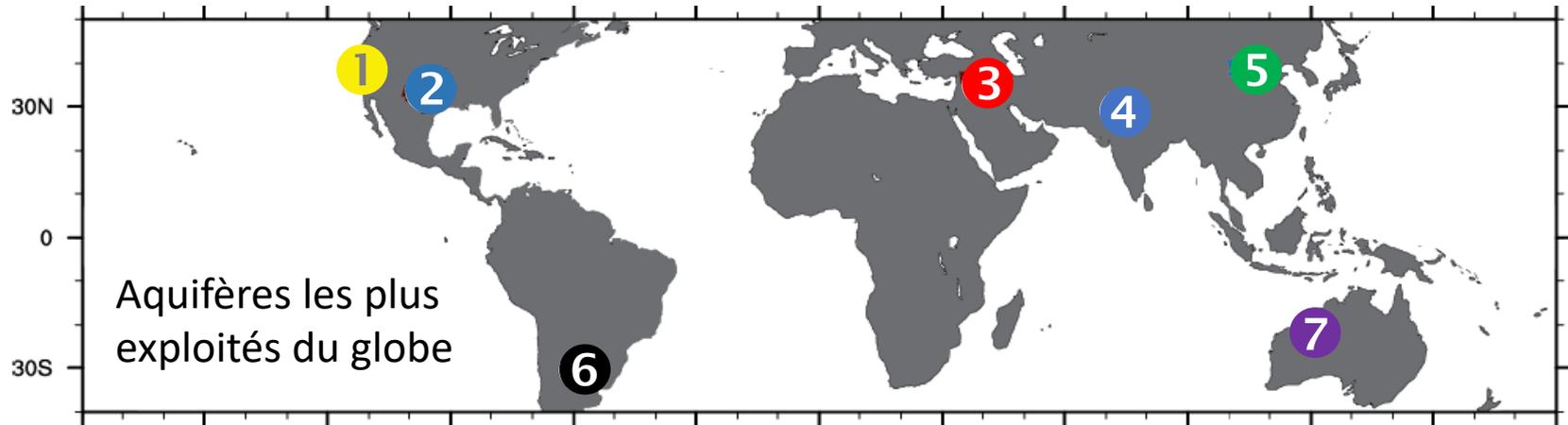
NoLR: modèle sans nappe profonde



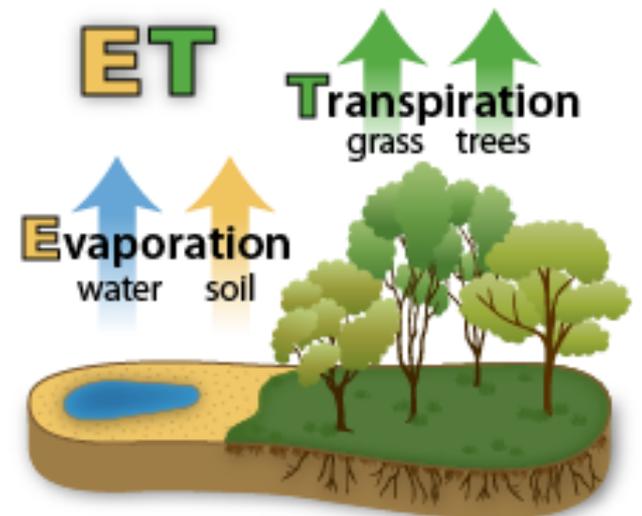
LR1: modèle avec nappe profonde



Les ressources en eau souterraine baissent



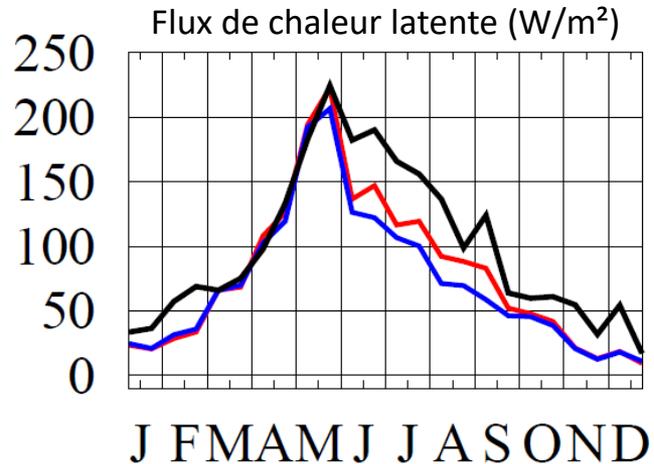
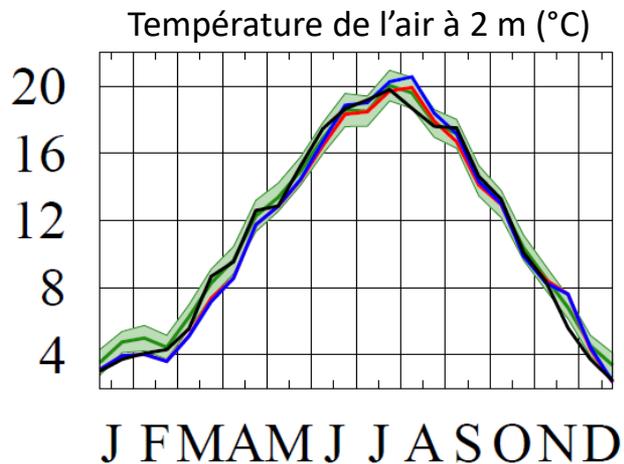
- Qu'entend-on par eaux souterraines ?
- Comment les étudie-t-on ?
- Liens avec les débits et les ressources en eau
- **Influence sur l'évapotranspiration**
- Liens avec le climat



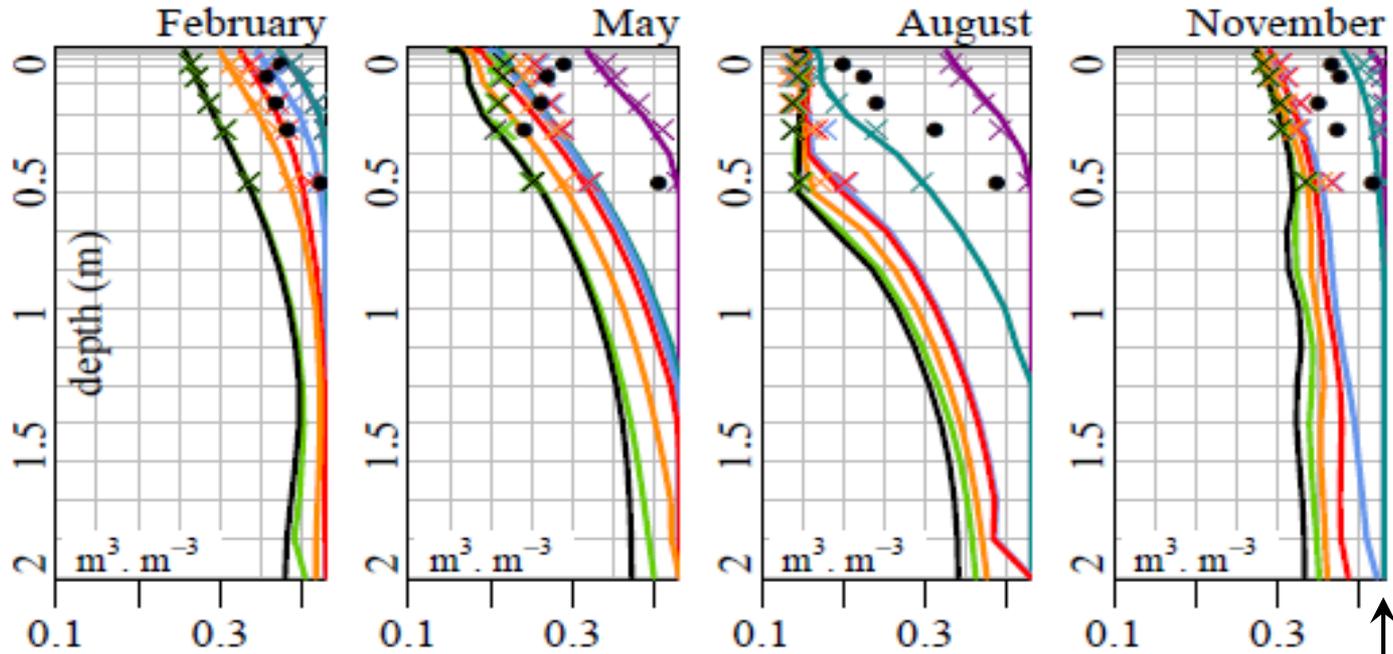
L'observatoire atmosphérique de l'IPSL



OBS
SIM



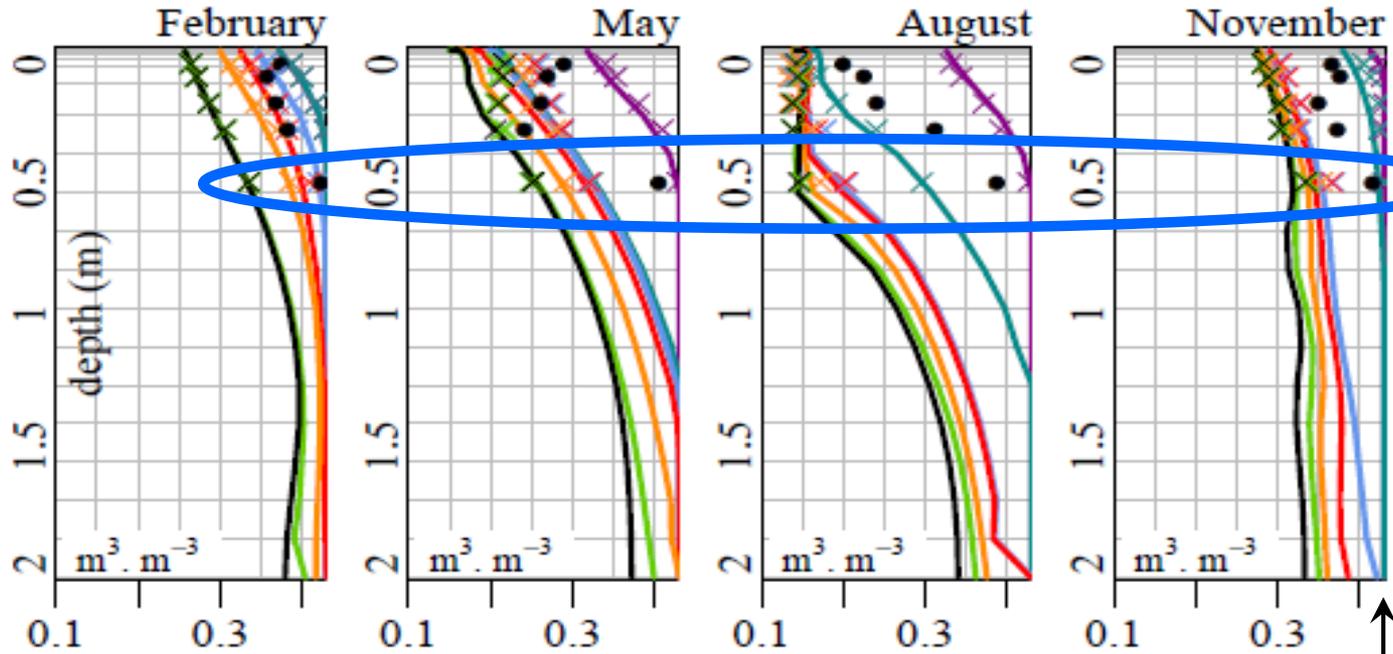
Mesures de l'humidité du sol



• OBS



Mesures de l'humidité du sol



• OBS

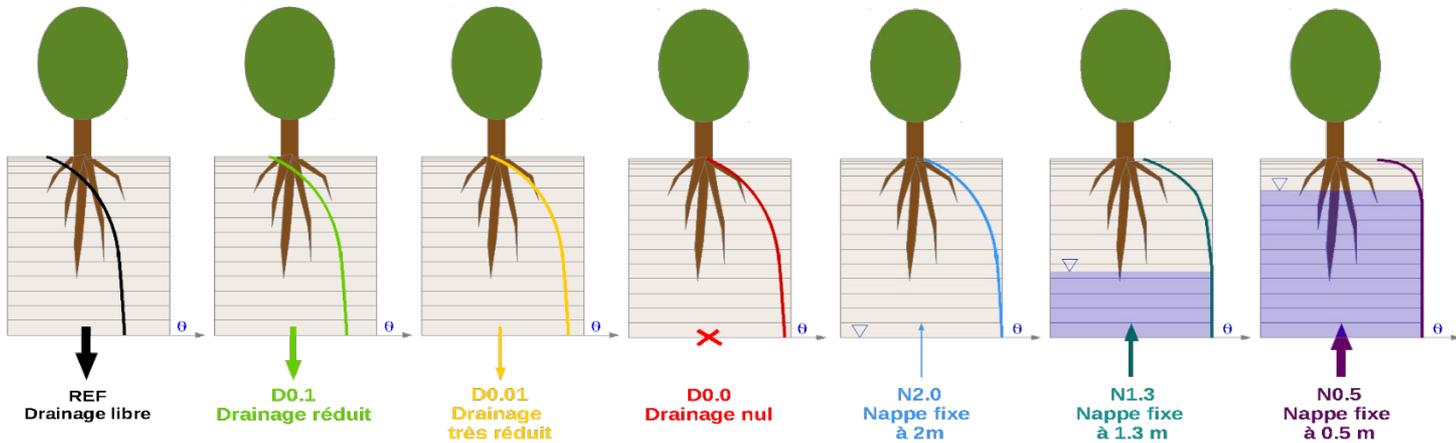
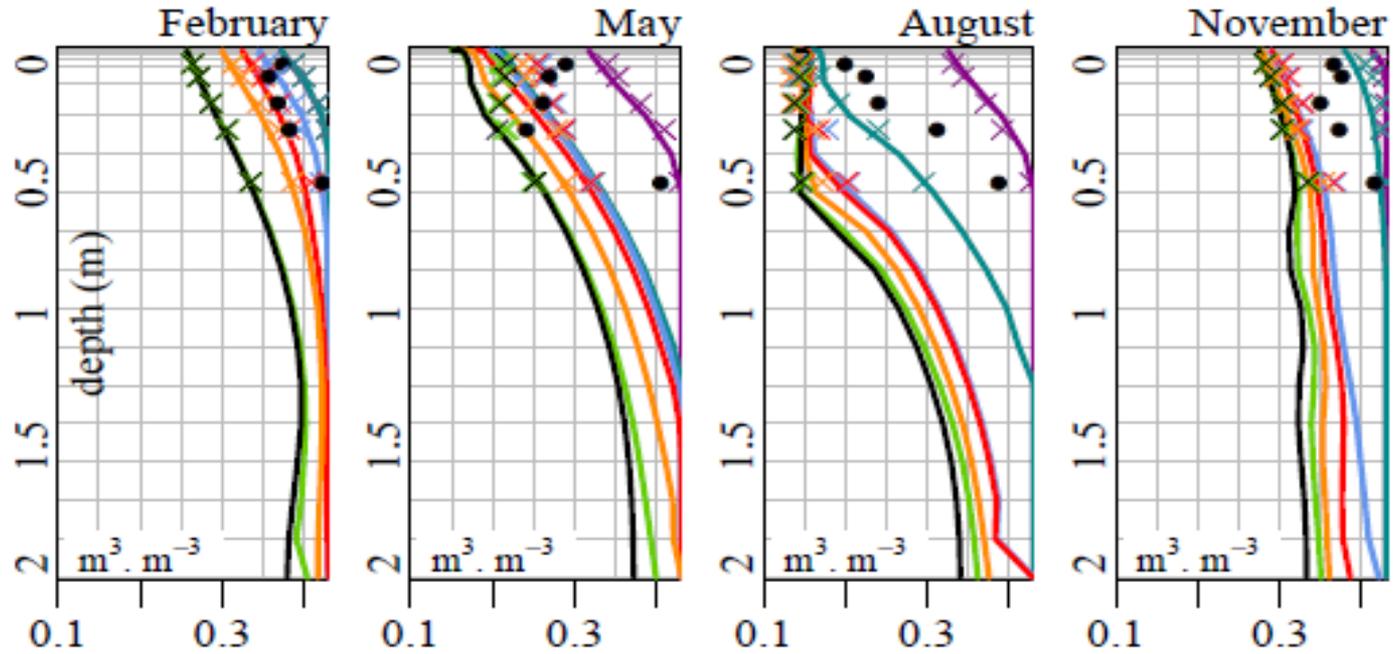


Nappe peu profonde au SIRTA, toute l'année

Saturation

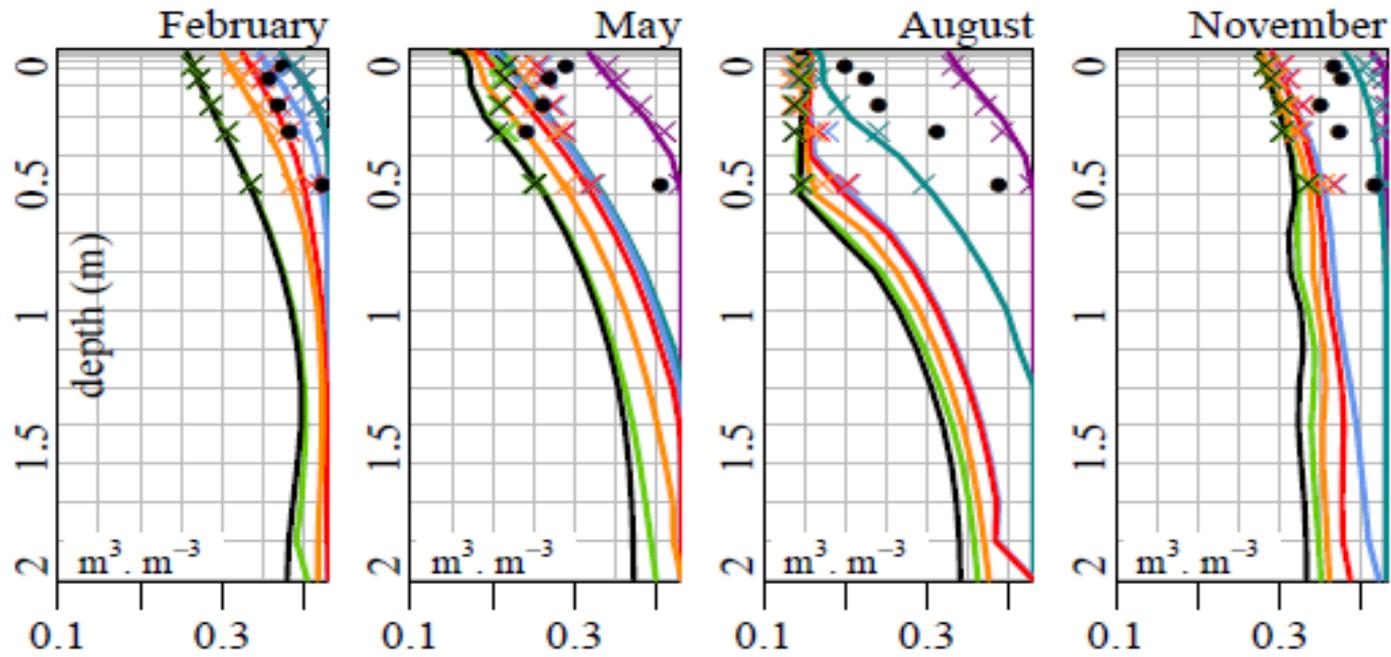
Simulation de l'humidité du sol

• OBS
— Sim

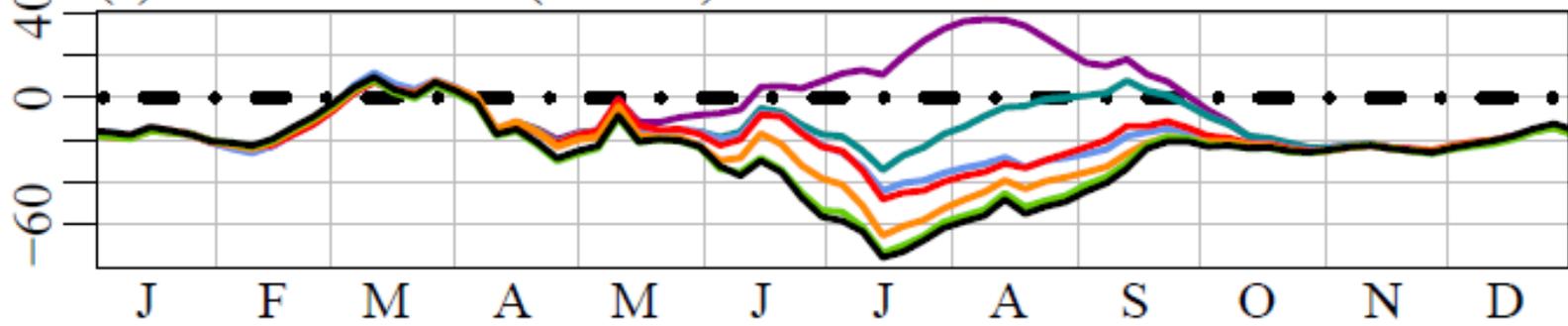


Influence sur l'évapotranspiration

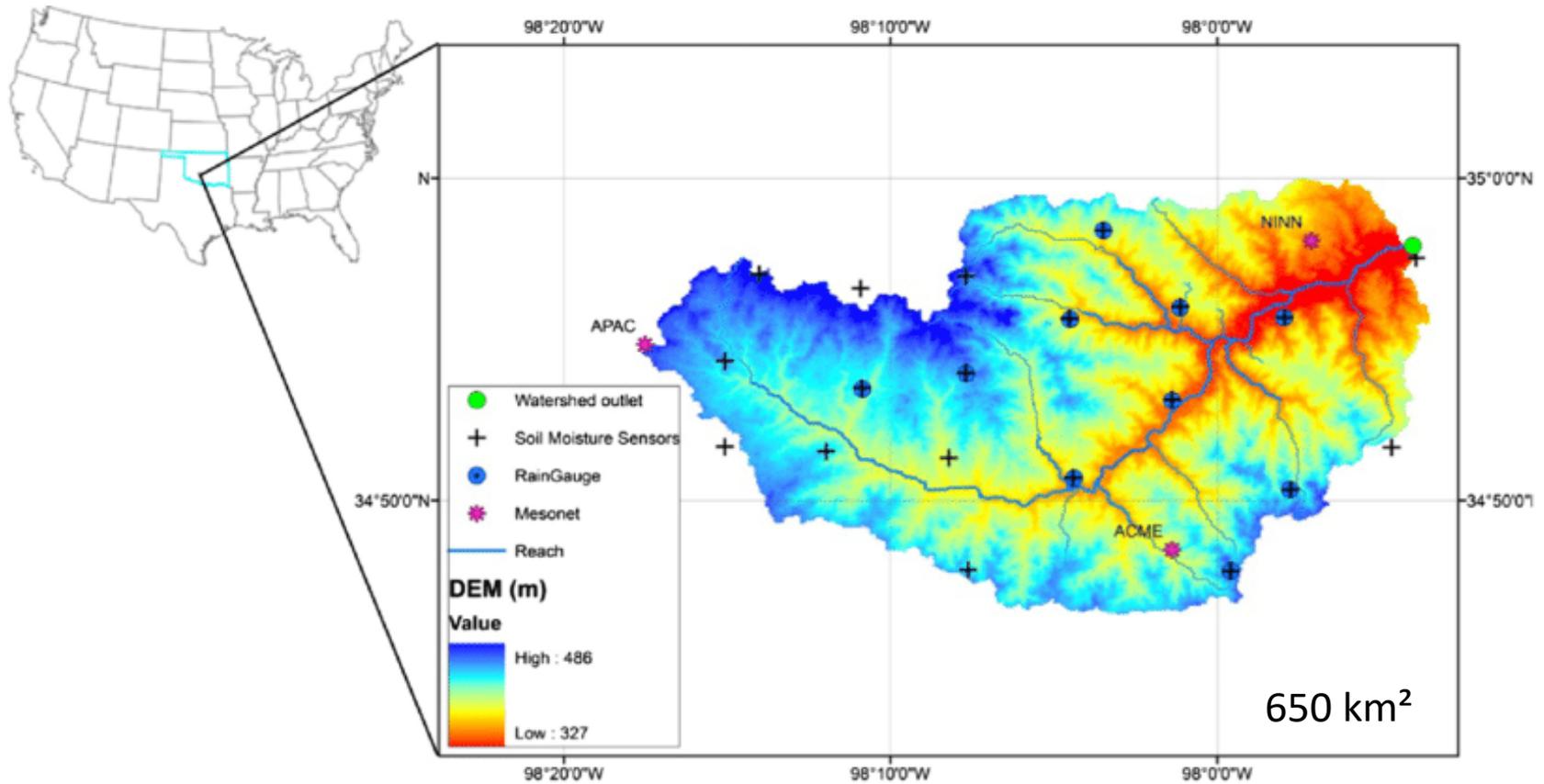
• OBS
— Sim



(a) Latent heat flux ($W \cdot m^{-2}$)

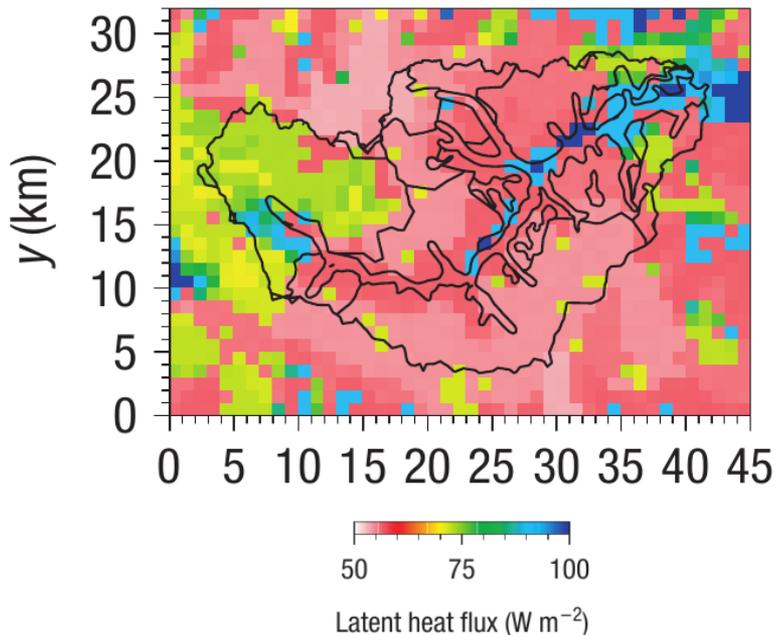


Le bassin versant expérimental du Little Washita

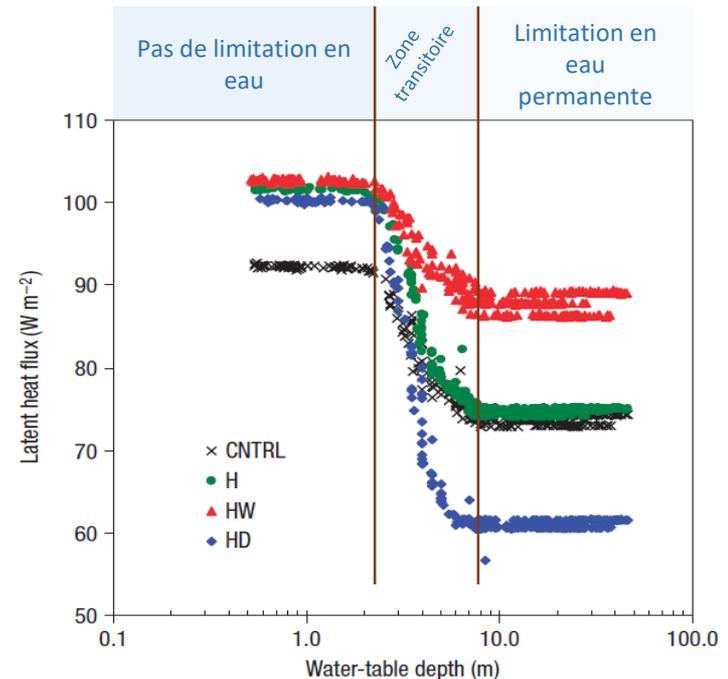


Le bassin versant expérimental du Little Washita

L'évapotranspiration dépend fortement de la profondeur de la nappe, qui varie à petite échelle en fonction de la topographie



Distribution spatiale du flux moyen annuel



Flux de chaleur latente en fonction de la profondeur de la nappe

- Qu'entend-on par eaux souterraines ?
- Comment les étudie-t-on ?
- Liens avec les débits et les ressources en eau
- Influence sur l'évapotranspiration
- **Liens avec le climat**



Modélisation du climat



Modèle
atmosphérique
global



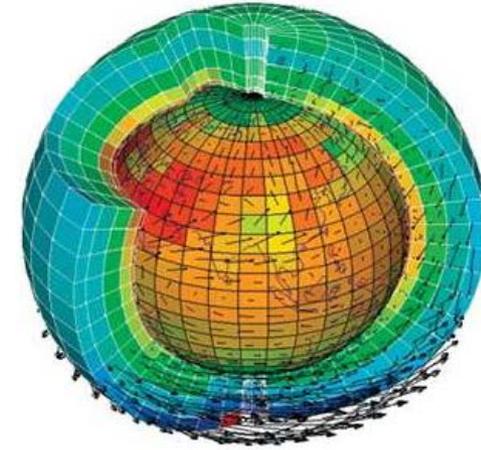
Modèle
océanique
global



Modèle
de surface
continentale



Modèle
de glace
de mer



Résolution horizontale
de 50 à 200 km

Modélisation du climat



Modèle
atmosphérique
global



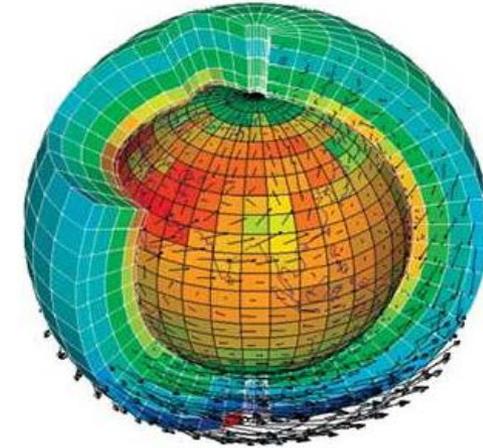
Modèle
océanique
global



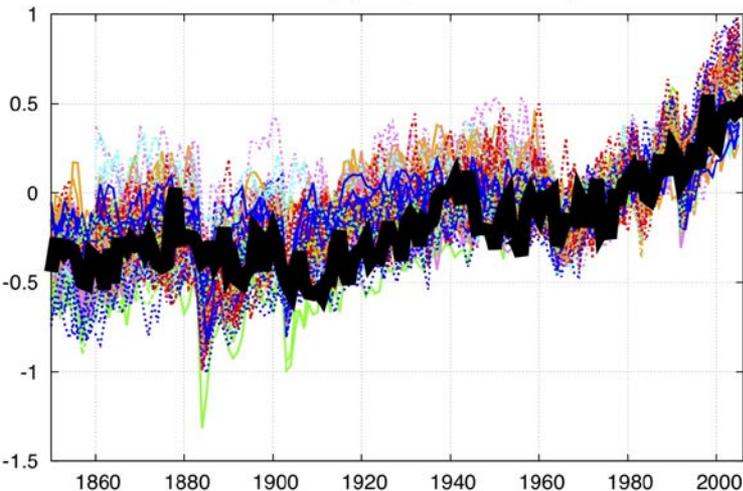
Modèle
de surface
continentale



Modèle
de glace
de mer



Résolution horizontale
de 50 à 200 km

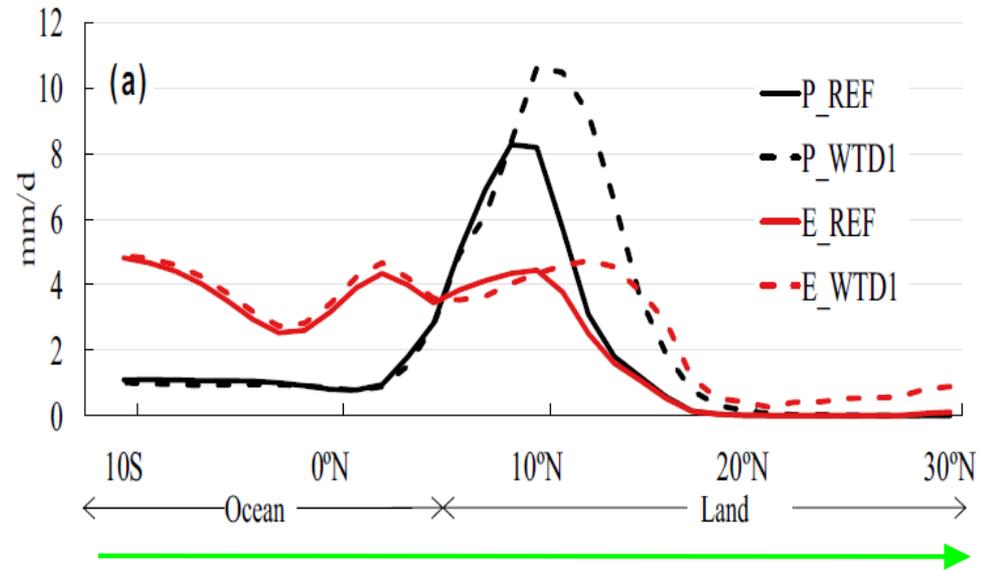
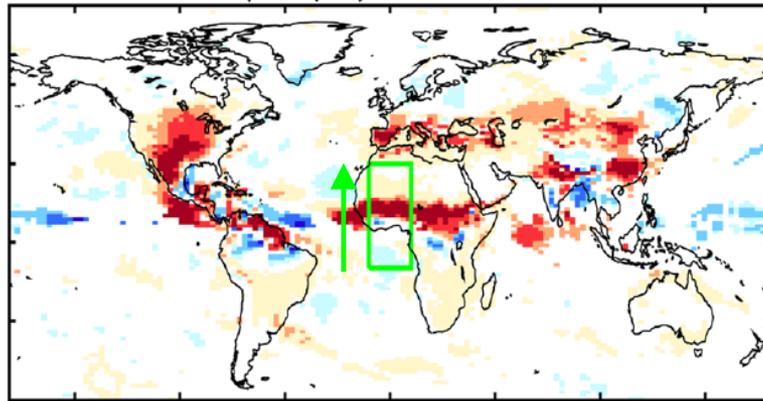


Reconstruction des température atmosphérique à 2m
par 20 modèles climatiques (CMIP5)
Suckling, 2011

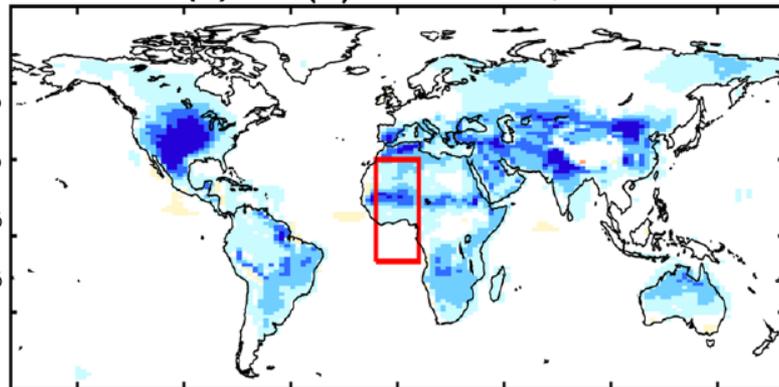
Exemple de la mousson Ouest-Africaine

Modèle climatique de l'IPSL, simulations WTD1 avec nappe à 1m vs REF sans nappe

Precipitation [mm/d], WTD1-REF, JJA



Near-surface air temperature [K], WTD1-REF, JJA

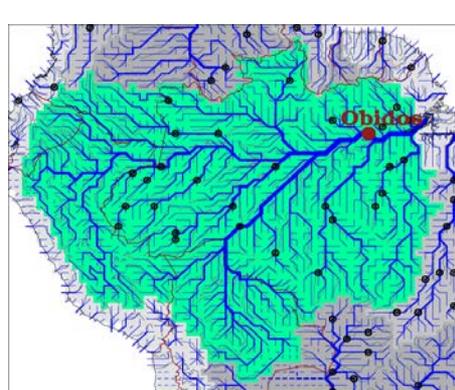
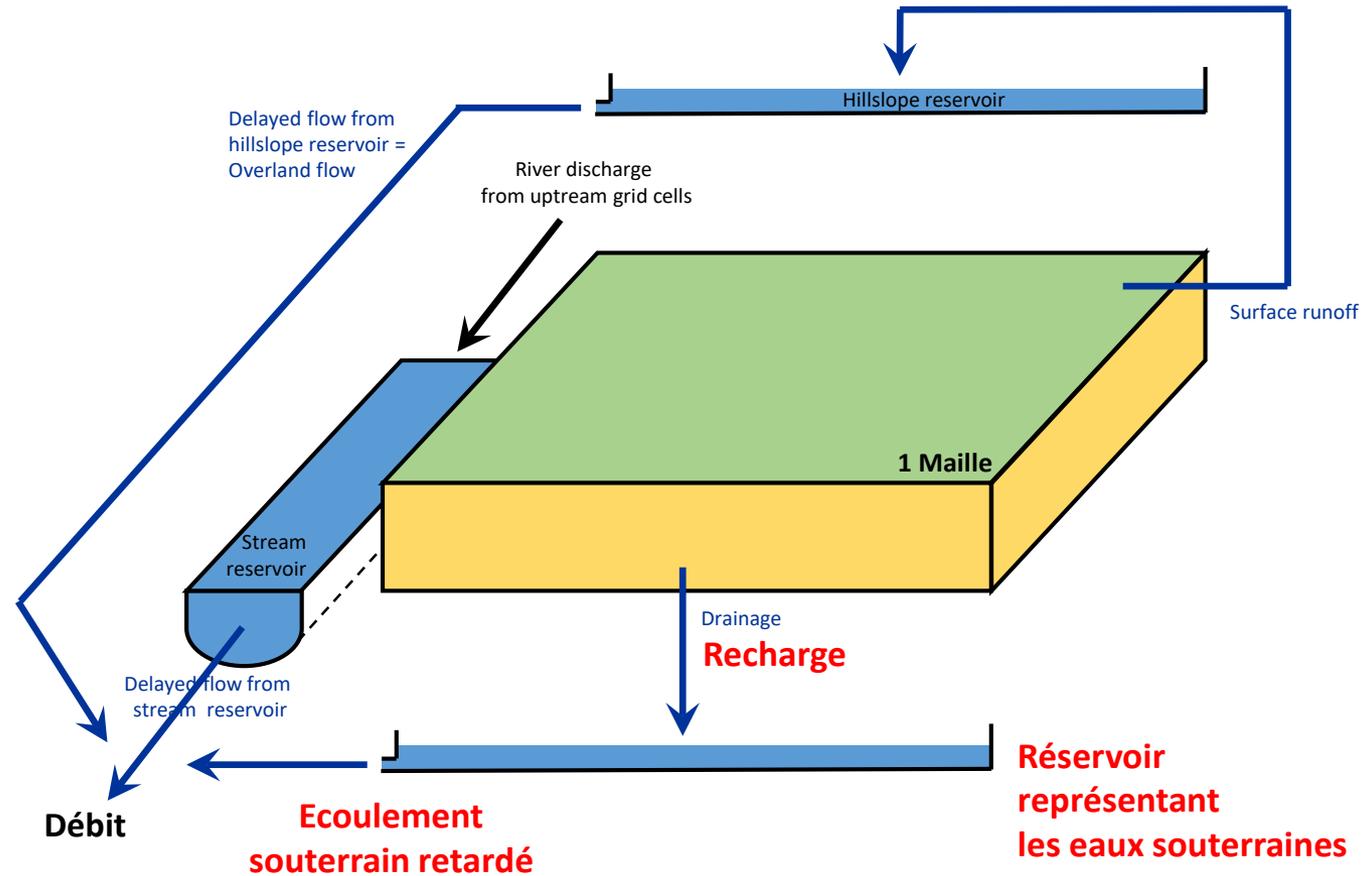


Le système de mousson avance plus au nord avec une nappe à 1m :

- Plus d'humidité atmosphérique alimente une convection plus forte
- La circulation méridienne est intensifiée

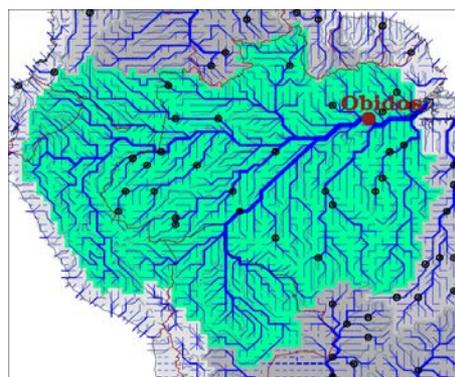
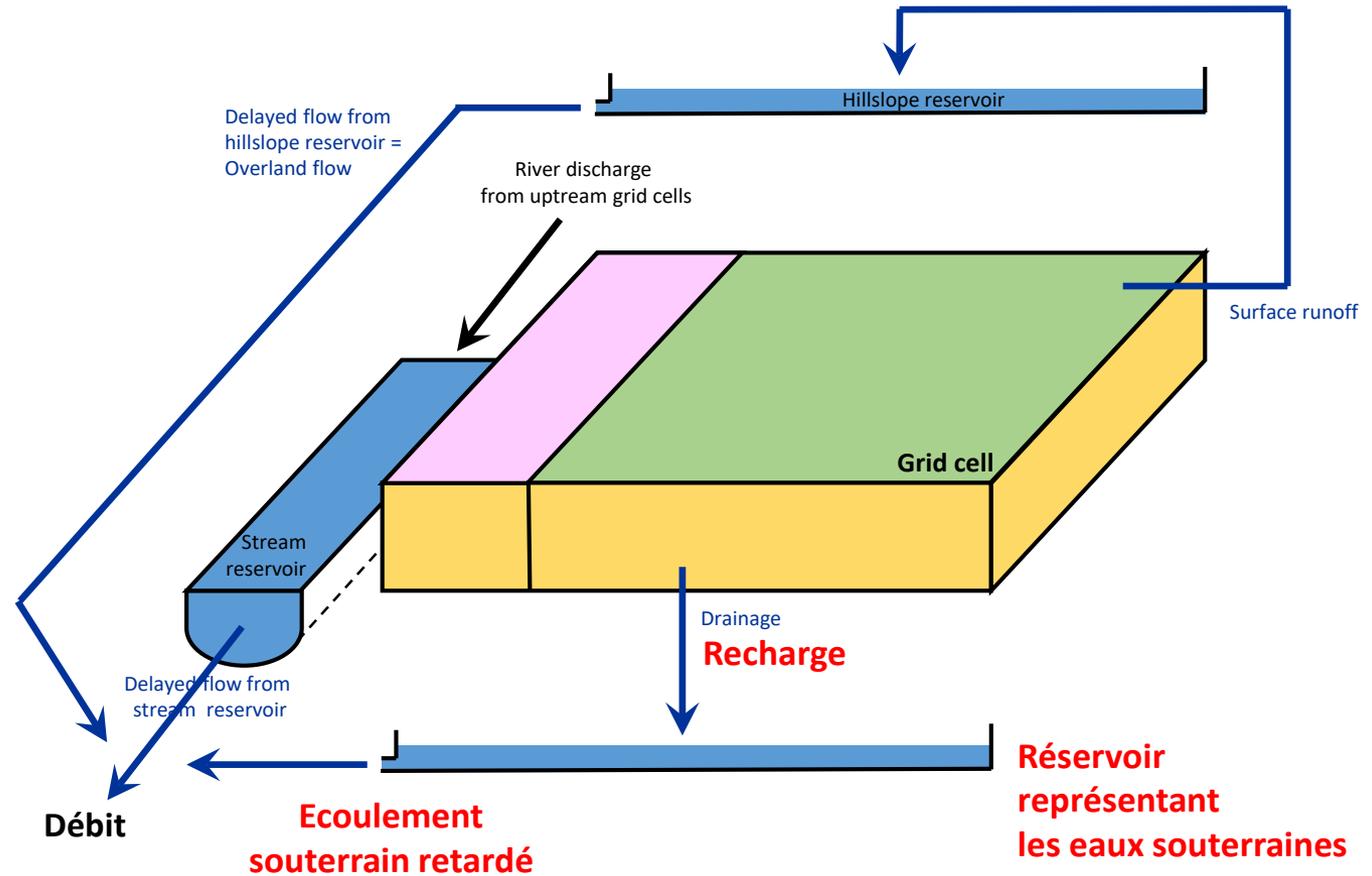
Vers une représentation plus réaliste des nappes

Le modèle de surface de l'IPSL décrit l'effet des eaux souterraines sur les débits mais pas sur l'humidité des sols



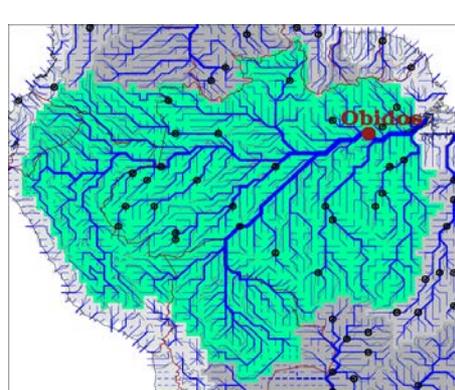
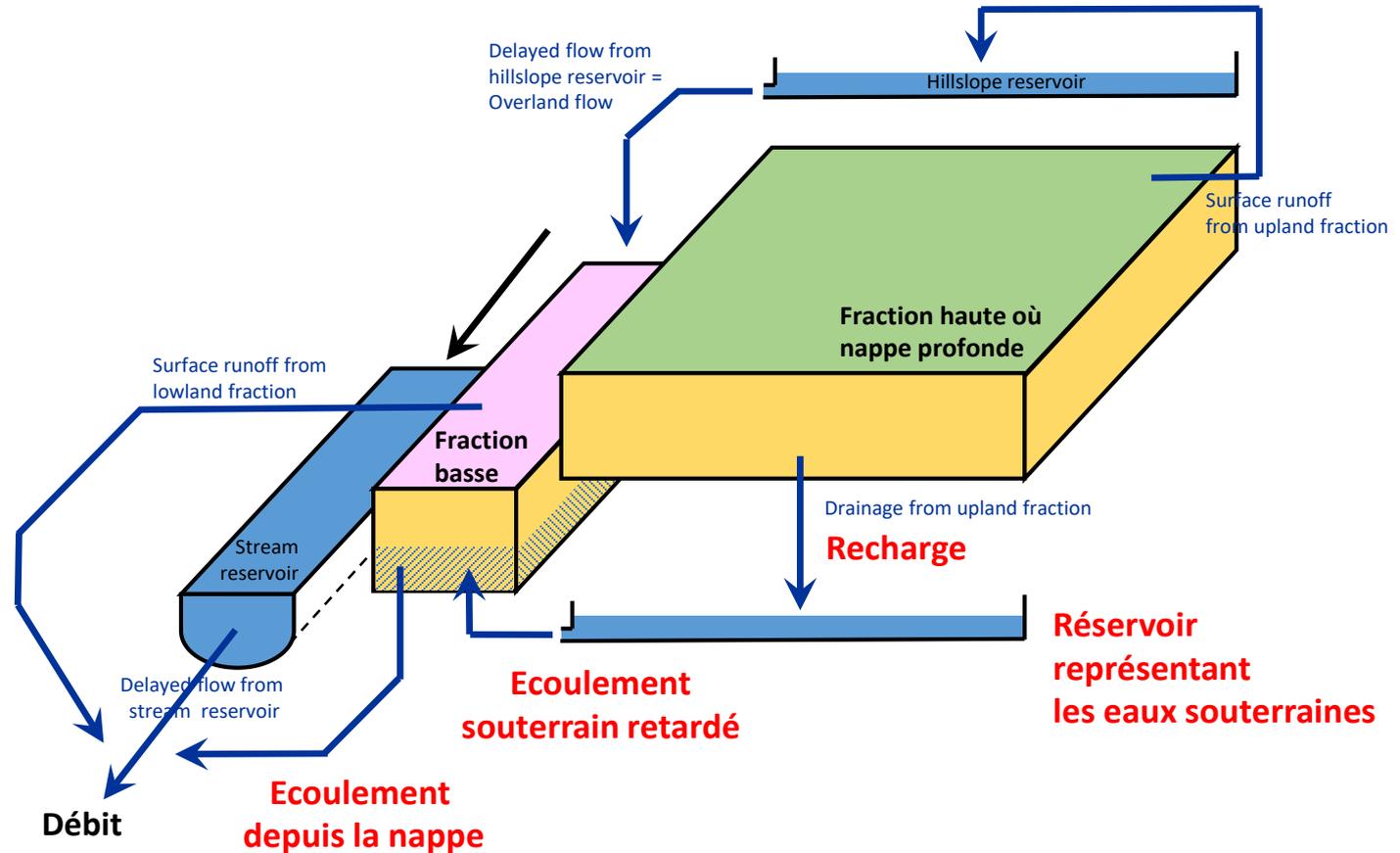
Vers une représentation plus réaliste des nappes

Introduction d'une nouvelle fraction...



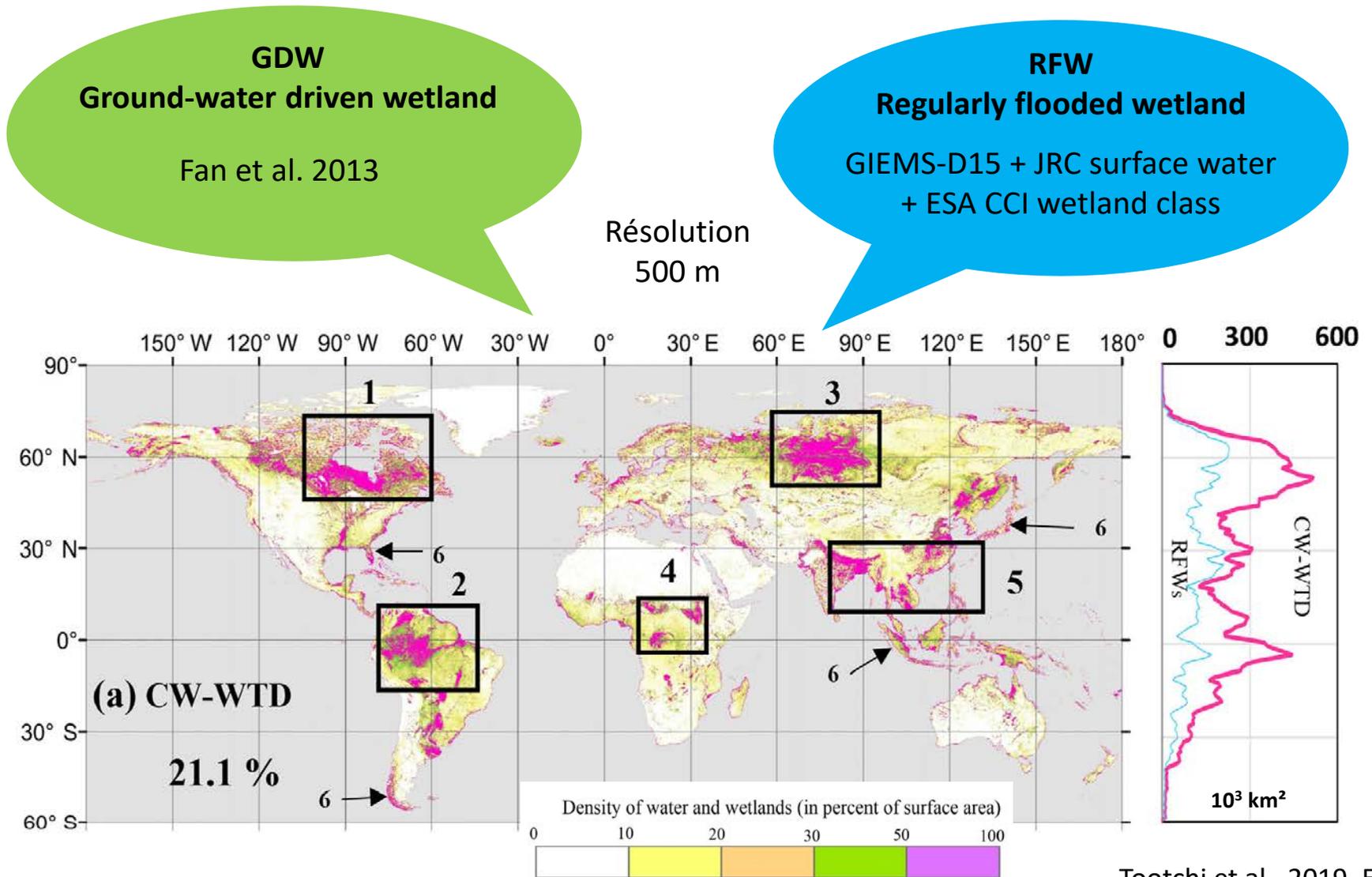
Vers une représentation plus réaliste des nappes

Introduction d'une nouvelle fraction...
« basse » et potentiellement humide
car alimentée par ces eaux souterraines

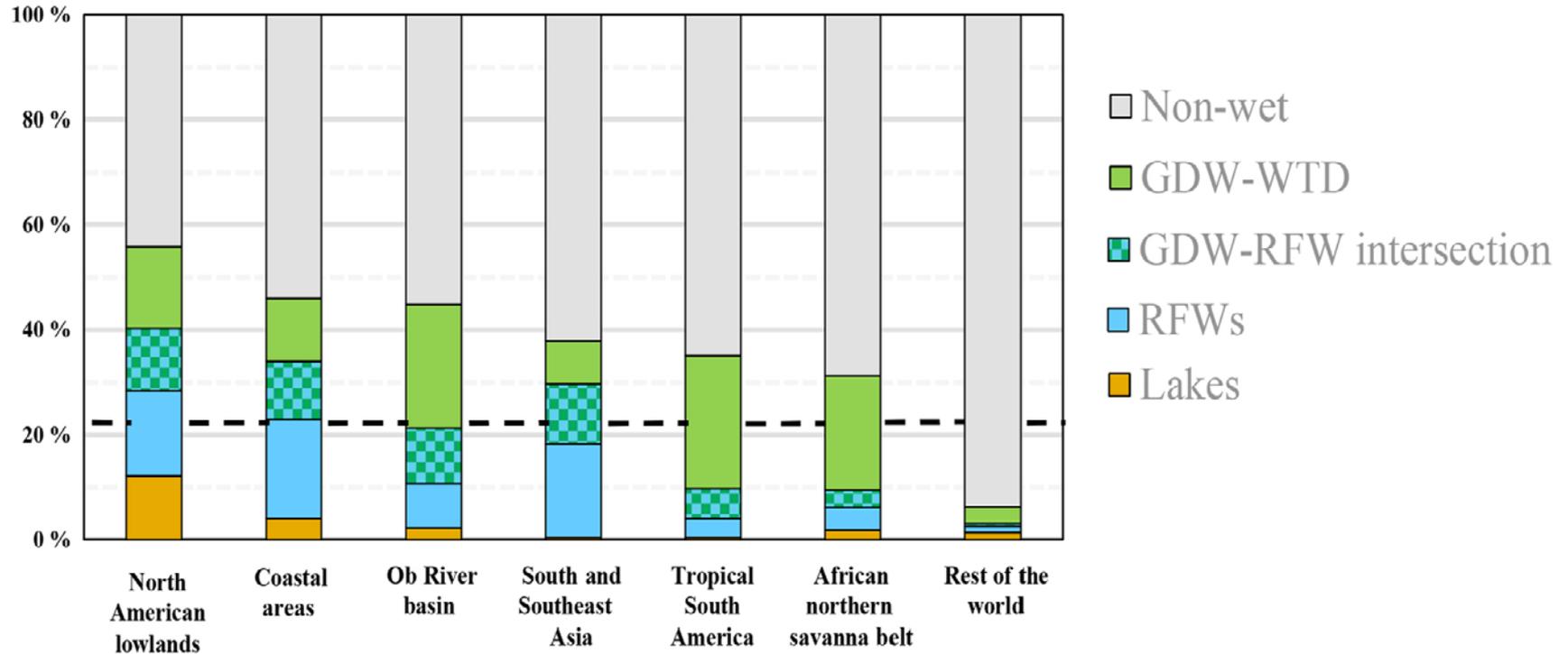


Vers une représentation plus réaliste des nappes

Cette fraction basse est décrite par une carte globale des zones potentiellement humides



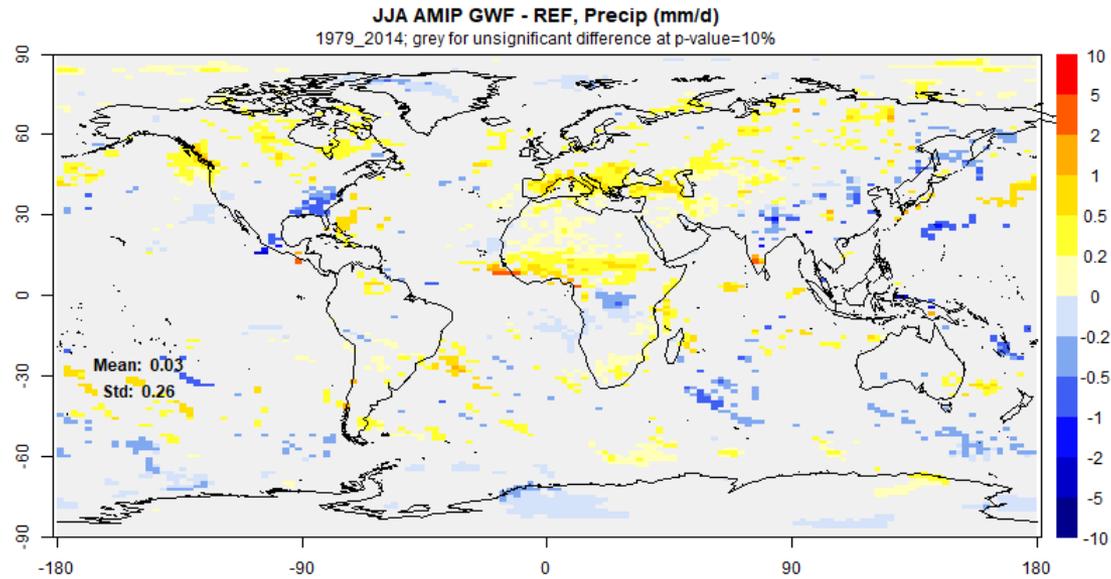
Vers une représentation plus réaliste des nappes



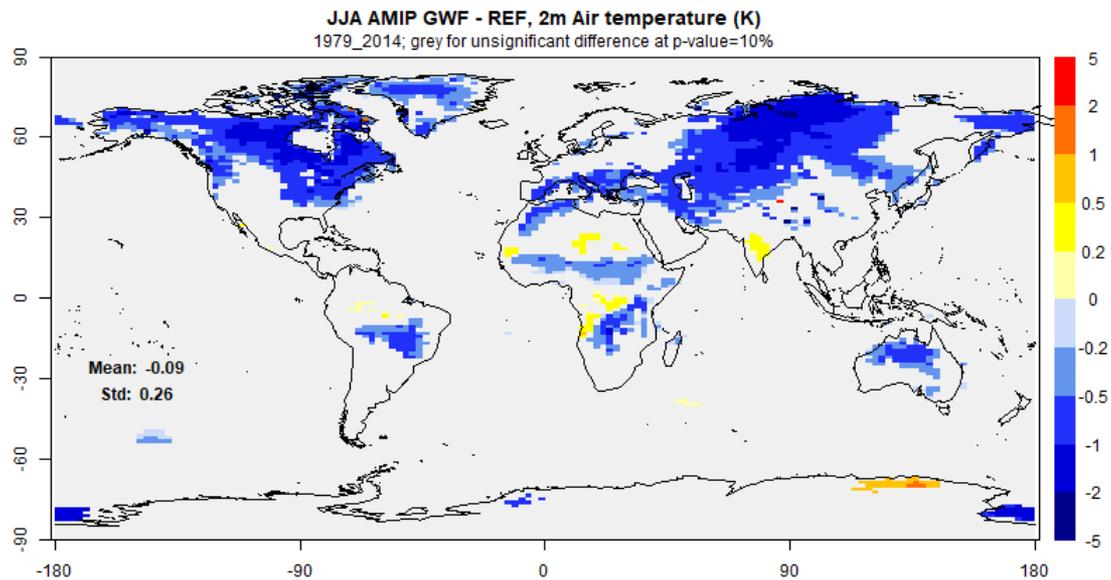
Contribution importante des nappes
dans les grandes mais aussi dans les petites zones humides
(ignorées par la plupart des satellites)

Impact sur le climat simulé

Été boréal
Juin-Juil-Août

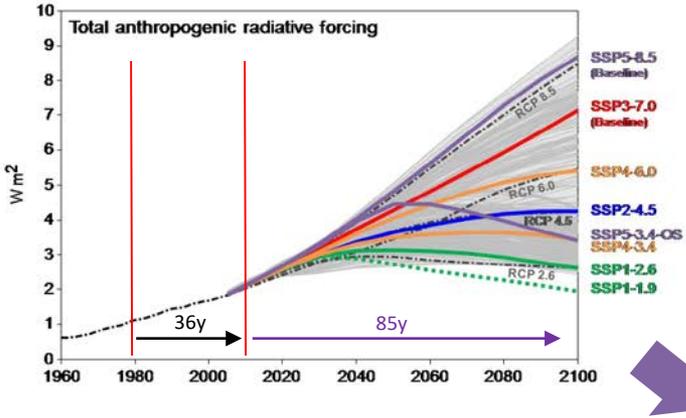


Précipitations
 $\Delta_{\text{glob}} = +1 \%$
 $\Delta_{\text{land}} = +2 \%$



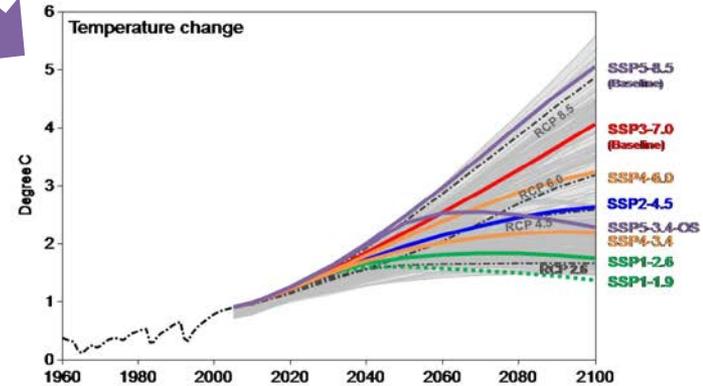
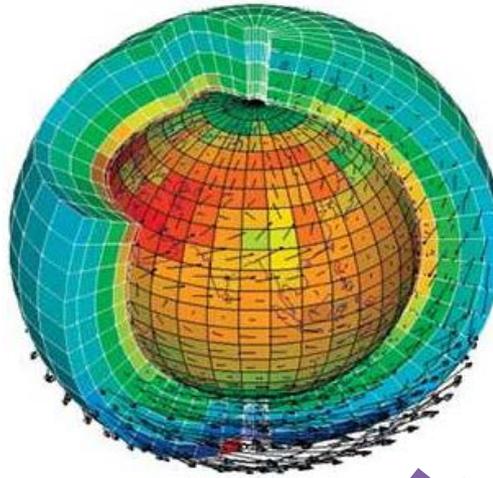
T2m
 $\Delta_{\text{glob}} = -0.1 \text{ C}$
 $\Delta_{\text{land}} = -0.3 \text{ C}$

Projection du climat futur

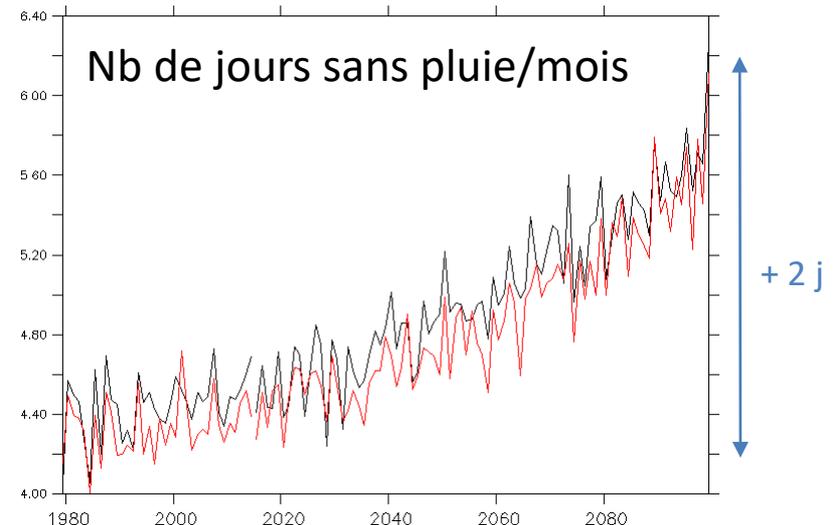
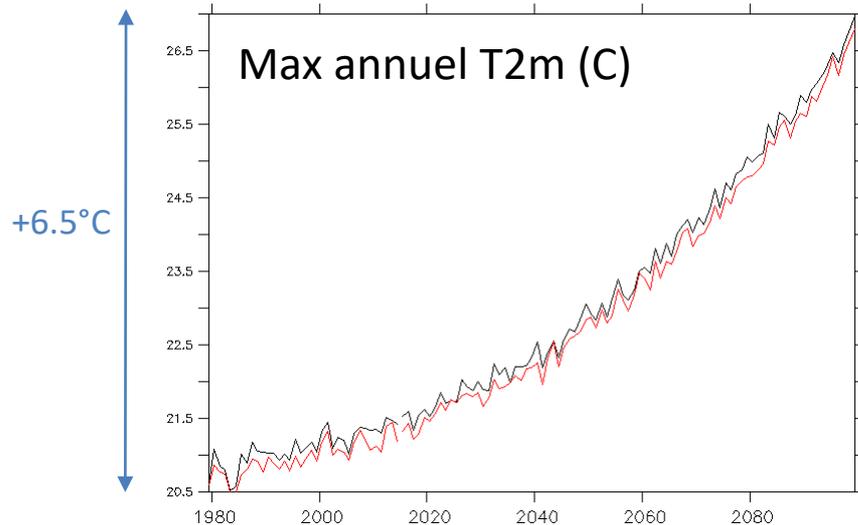
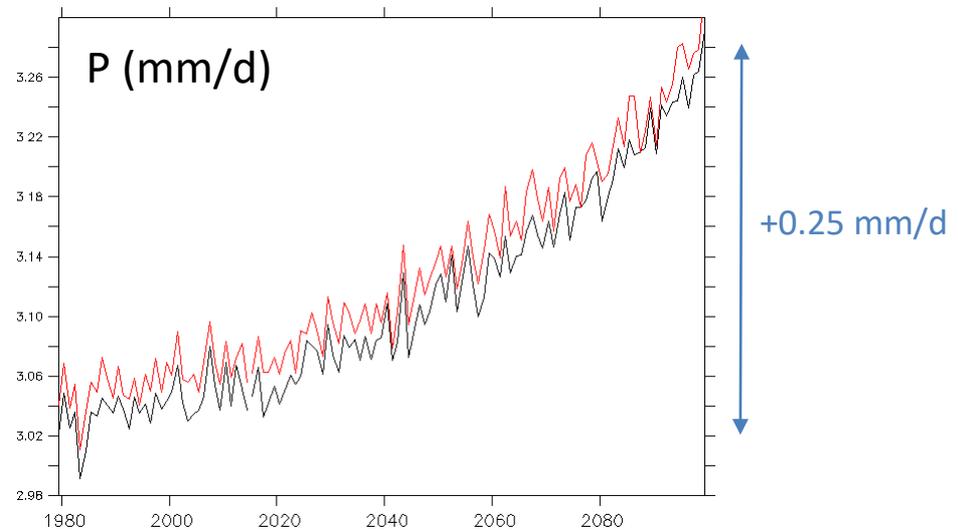
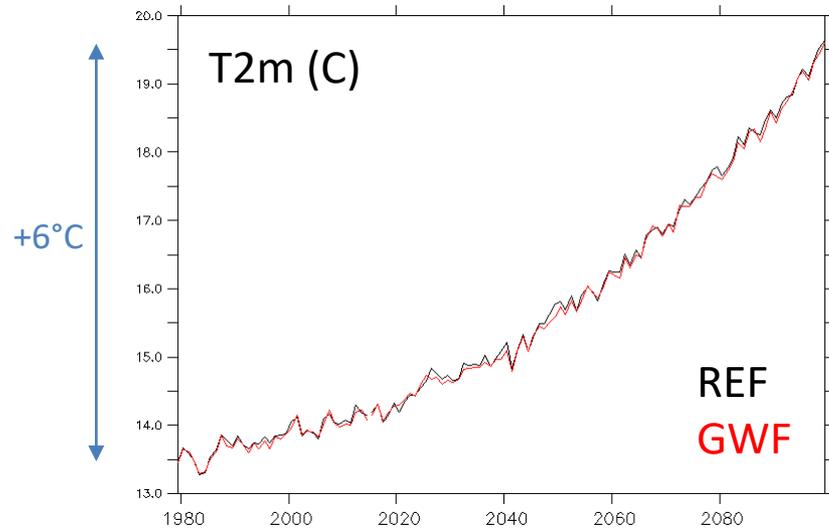


1979-2100

Forçages radiatifs historiques
Puis scénario **SSP5-8.5**

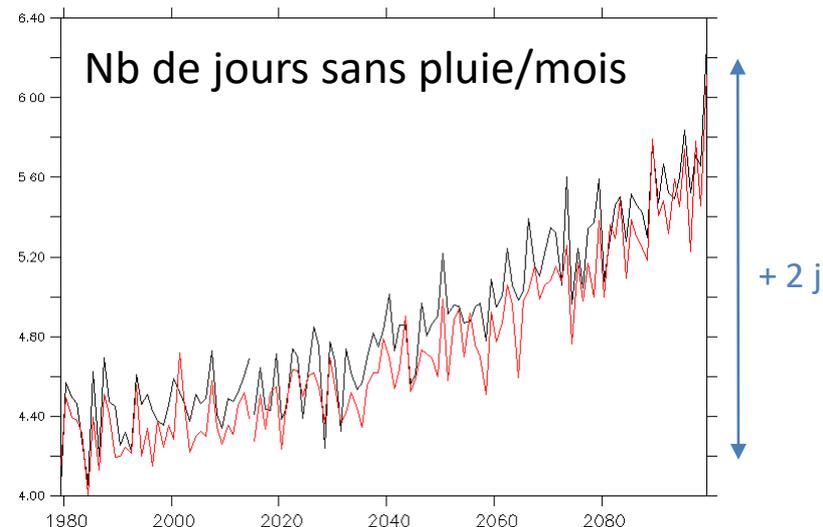
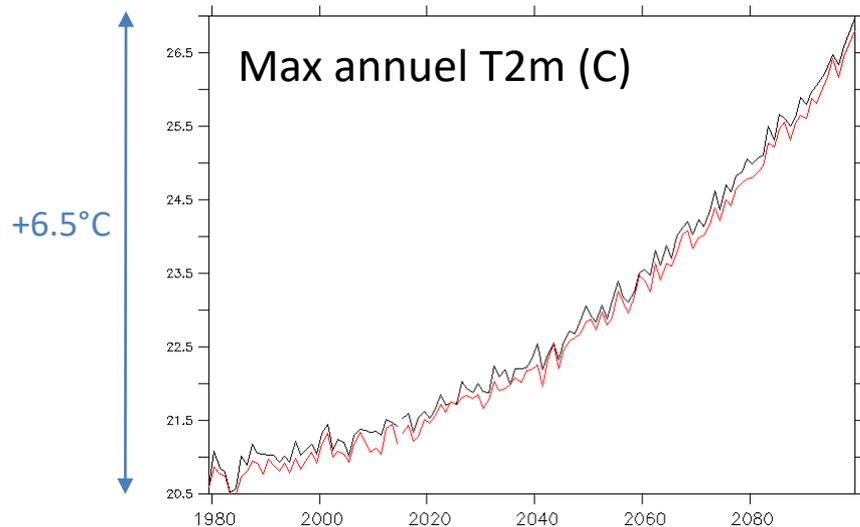
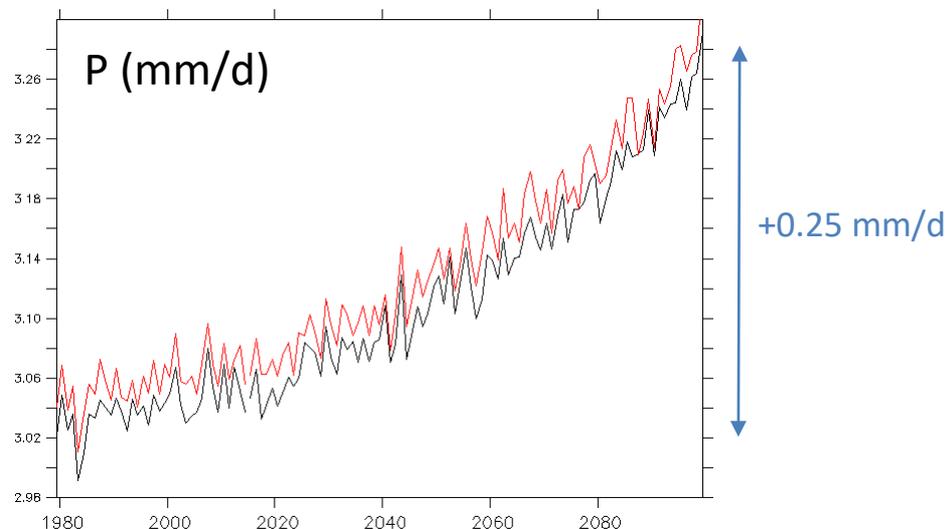
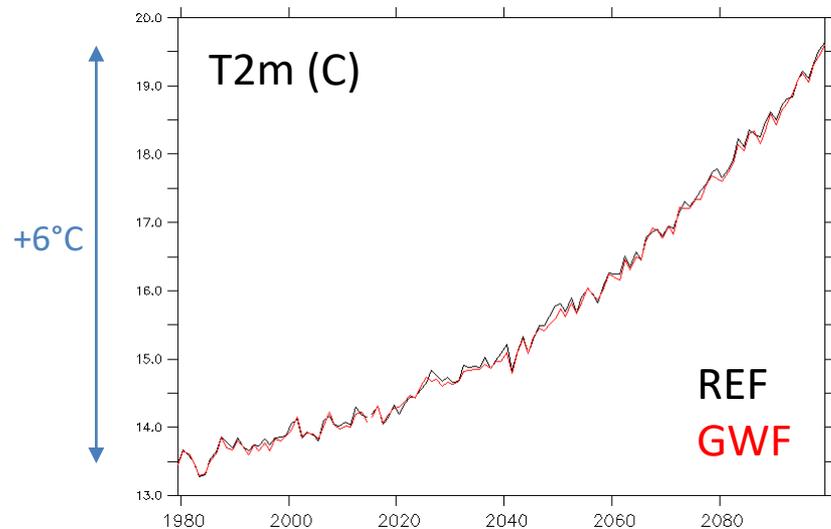


Résultats préliminaires



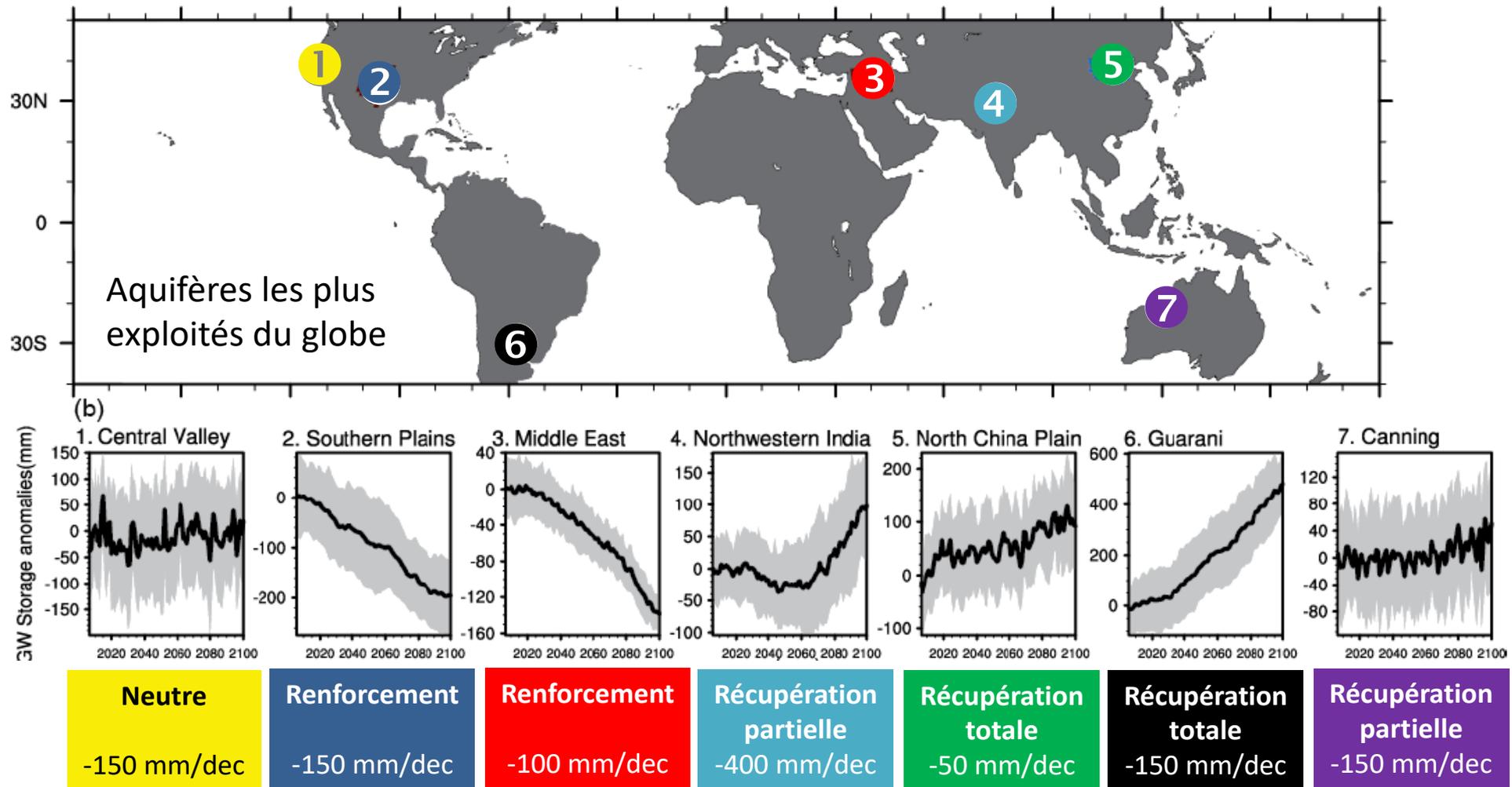
Modèle climatique de l'IPSL, moyennes globales, 1 valeur par an

Résultats préliminaires



Les nappes semble atténuer certaines manifestations du réchauffement global

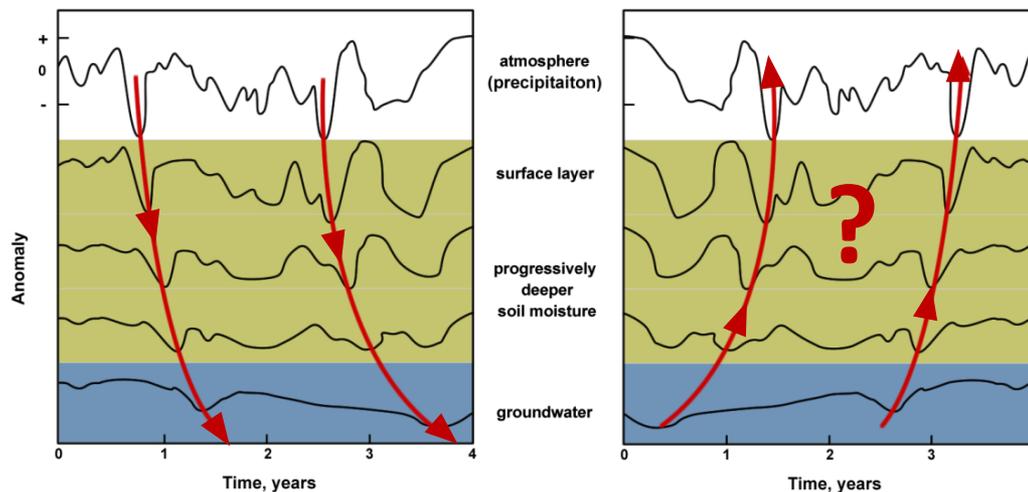
Impact réciproque



Modèle CESM,
30 simulations sous scénario RCP8.5
Wu et al., in revision

Messages à retenir

- Les eaux souterraines sont une ressource importante et fortement exploitée
- Leur effet tampon réduit la vulnérabilité aux sécheresses
- Leur influence sur le climat est probablement modérée à l'échelle de la planète mais peut être importante localement
- **Elles restent encore largement méconnues**
 - Structure et fonctionnement « naturels »
 - Impact sur la variabilité du climat (atténuation des extrêmes)
 - Interactions avec les activités humaines et le changement climatique



Merci de votre attention



©VITANOVSKI/FOTOLIA

