

# **Etude du cycle de l'eau en Afrique Sahélienne**

## **Approche multidisciplinaire et apport de la gravimétrie terrestre et spatiale**



**Thèse de doctorat présentée par Julia Pfeffer,  
dirigée par Jacques Hinderer,  
financée par une bourse ministérielle,  
soutenue à l'Université de Strasbourg, le 30/09/2011**

# Sommaire

- **Le milieu sahélien**
- **Théorie associée à l'hydrogéodésie**
- **Analyse de deux cycles de mousson**
- **Variabilité spatiale des stocks d'eau**

# Le milieu sahélien: zone de transition éco-climatique

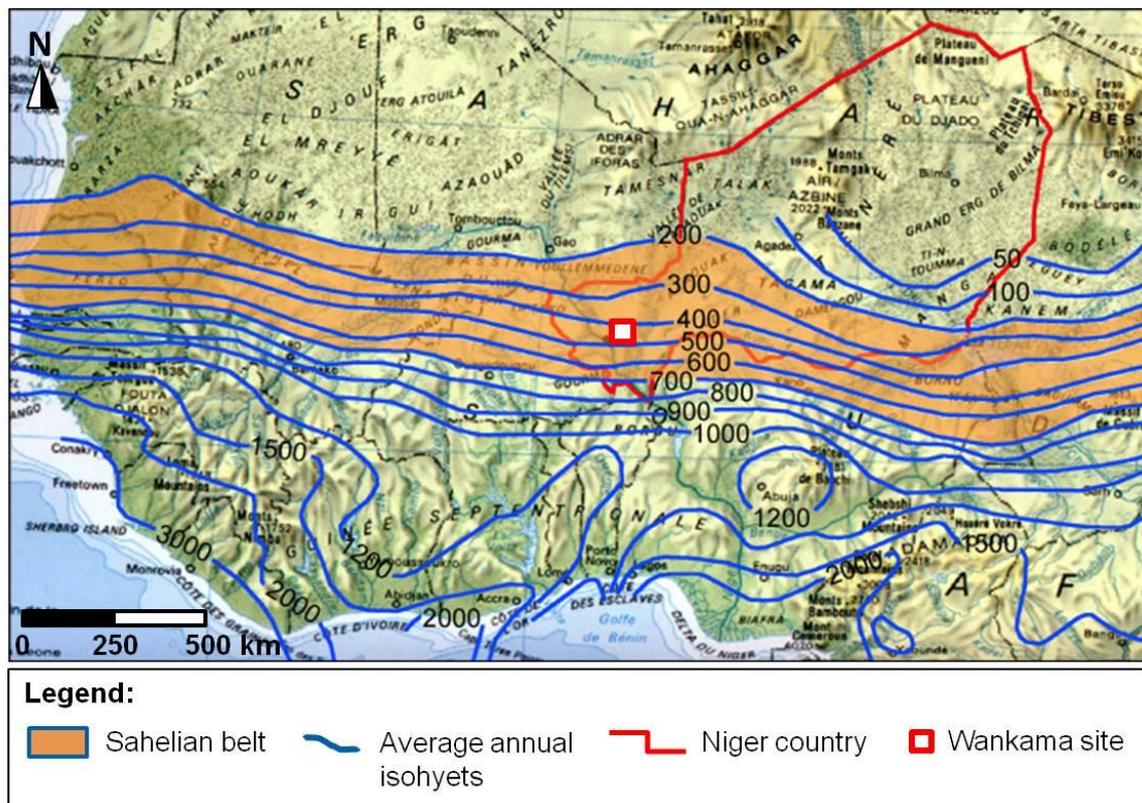


Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

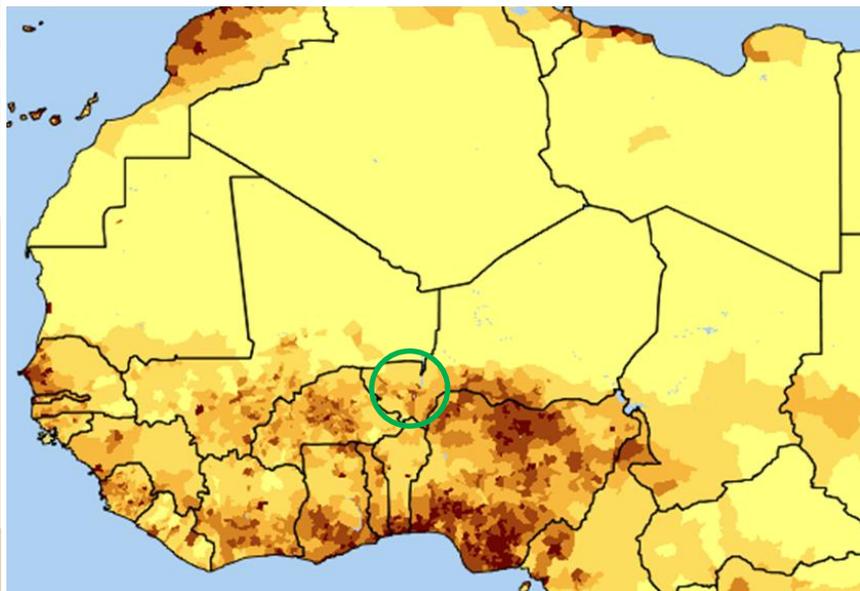


**Carte du Sahel. Les lignes bleues sont les isohyètes indiquant les précipitations moyennes annuelles de 1950 à 1989.  
(L'Hôte & Mahé, 1996)**

# Le milieu sahélien: une population croissante



Densité de la population en 2000 (hab./km<sup>2</sup>)



  
< 5    50    250

<http://sedac.ciesin.columbia.edu>

**Sud – Ouest du Niger:**

**Densité moyenne ~ 30 hab/km<sup>2</sup>**

**Croissance pop. ~ + 4 % an<sup>-1</sup>**

**Vie au puits**



**Champ de mil**



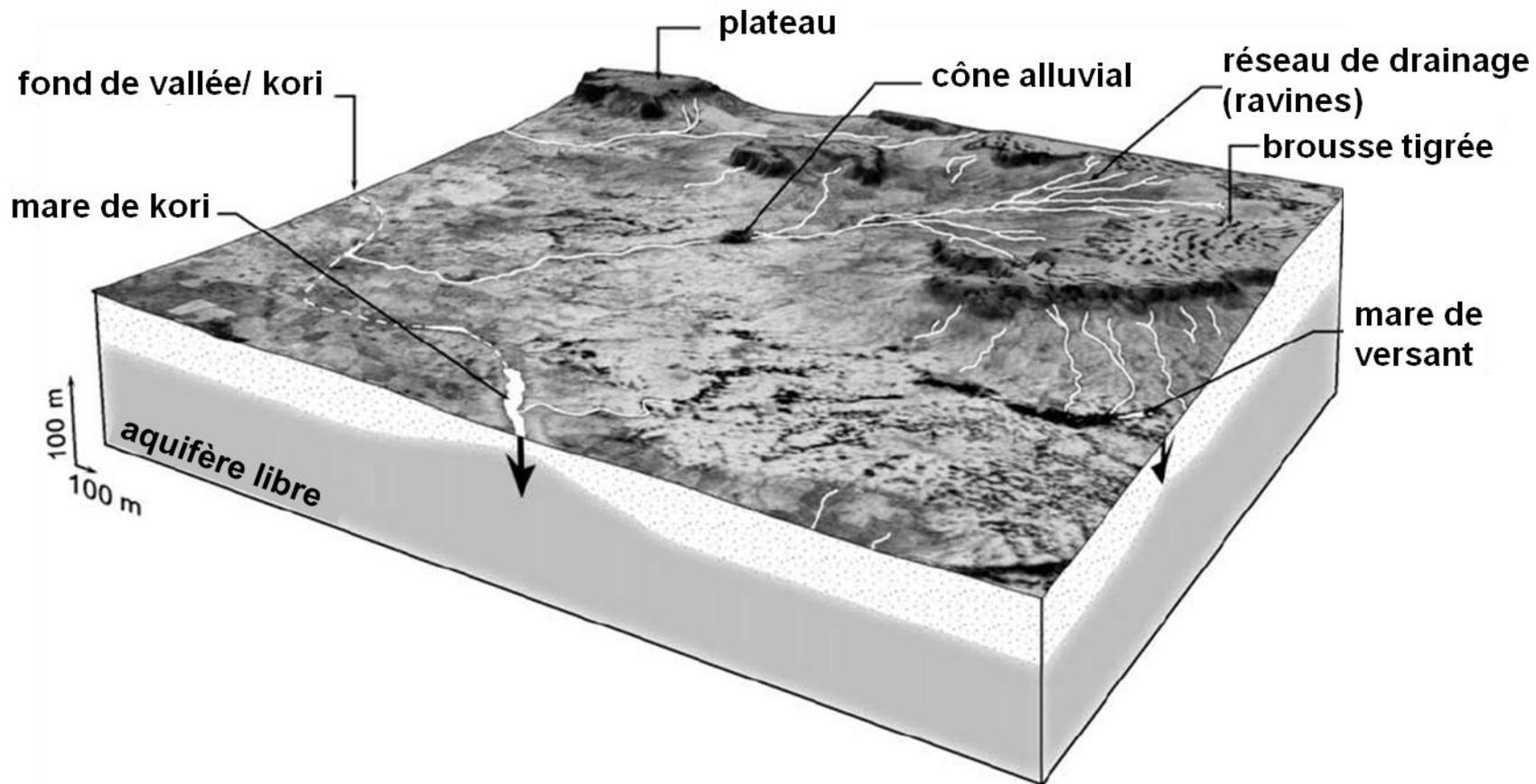
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Le milieu sahélien: région endoréique semi-aride



Bloc diagramme typique des paysages sahéliens du Sud-ouest Nigérien  
(Massuel, 2005)

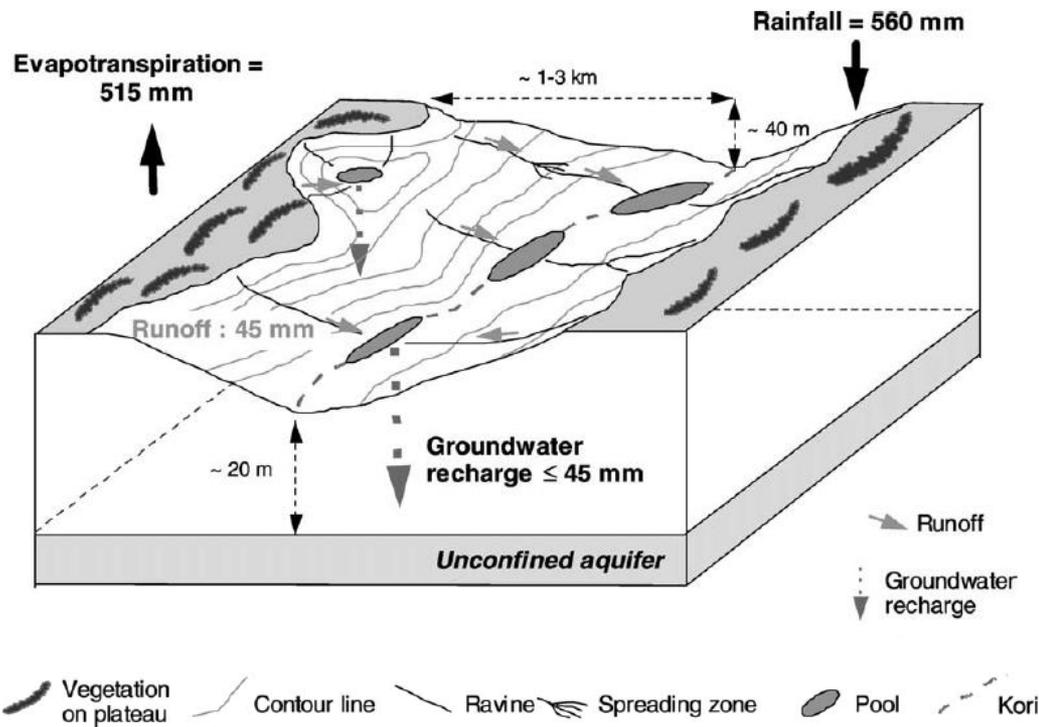
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Le milieu sahélien: fonctionnement hydrologique



- Forte variabilité des précipitations
- Ruissellement hortonien épisodique
- Forte évapotranspiration
- Infiltration superficielle
- Recharge de la nappe ponctuelle & indirecte

Principaux processus hydrologiques,  
associés à une toposéquence typique.  
(Peugeot et al., 2003)

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

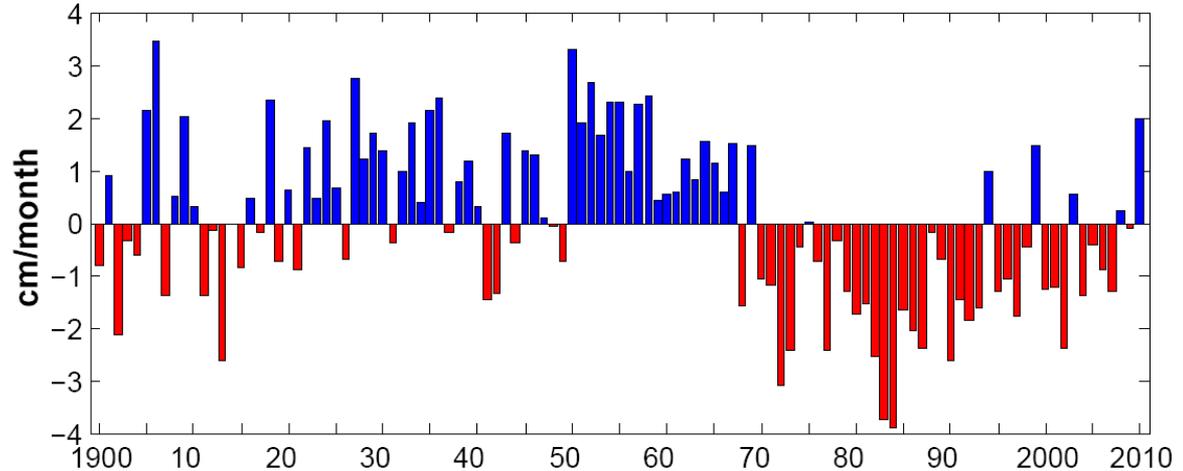
Variations  
spatiales

# Le milieu sahélien: un milieu changeant

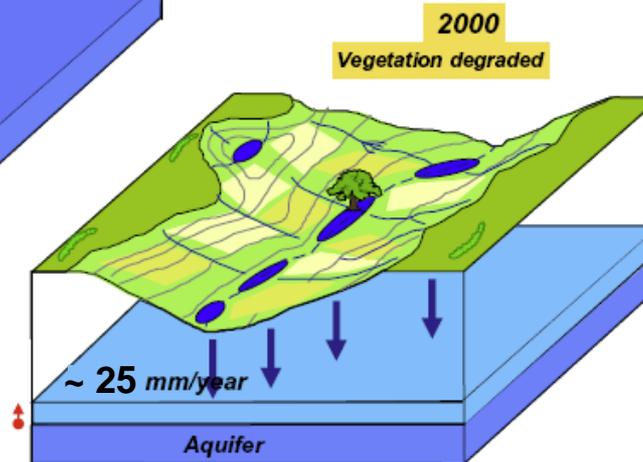
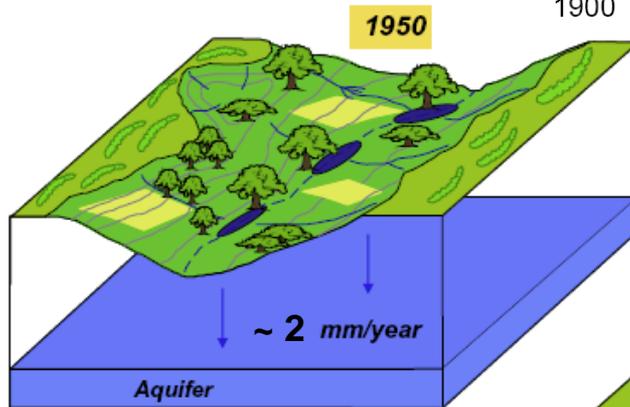


30 années de déficit  
pluviométrique ...

Sahel precipitations anomalies 1900 – 2010



data from the University of Washington  
Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean



... mais une hausse  
constante du niveau  
de la nappe

(+ 4 m de 1963 à 2007)

(Favreau et al., 2009;  
Lebel et al., 2009)

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Le milieu sahélien: quelques questions en suspens ...



L'augmentation du **ruissellement (x 3)** ne suffit pas à expliquer l'augmentation de la **recharge de la nappe (x 10)** ...

Comment quantifier la distribution des masses d'eau au sein d'un système continental?

**Enjeux:** → **Gestion des ressources en eau**  
→ **Compréhension des interactions avec le climat**

Sahel

Hydro-gravimétrie

Cycles de mousson

Variations spatiales

# Le milieu sahélien: apport de la gravimétrie?



Observations	Géodésie	Hydrologie
In-situ	Gravimétrie (GPS)	Paramètres du bilan hydrologique
Satellites	GRACE	Modèles hydrologiques globaux

Objectif du projet **GHYRAF** (**G**ravité et **H**ydrologie en **A**frique)

Apport de nouvelles contraintes sur le cycle de l'eau en  
Afrique de l'ouest par confrontation d'observables  
géodésiques et hydrologiques

(Hinderer et al., 2009; 2011)

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales



**THÉORIE ASSOCIÉE À  
L'HYDROGÉODÉSIE**

# Hydrogéodésie: effets des masses d'eau sur la forme de la Terre et son champ de gravité

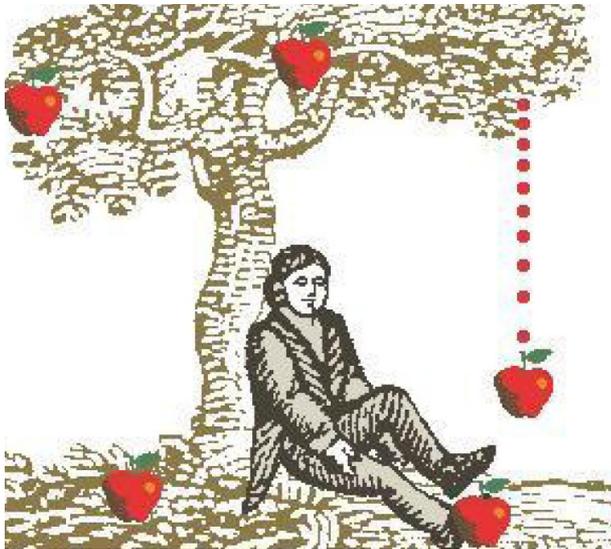


Sahel

Hydro-  
géodésie

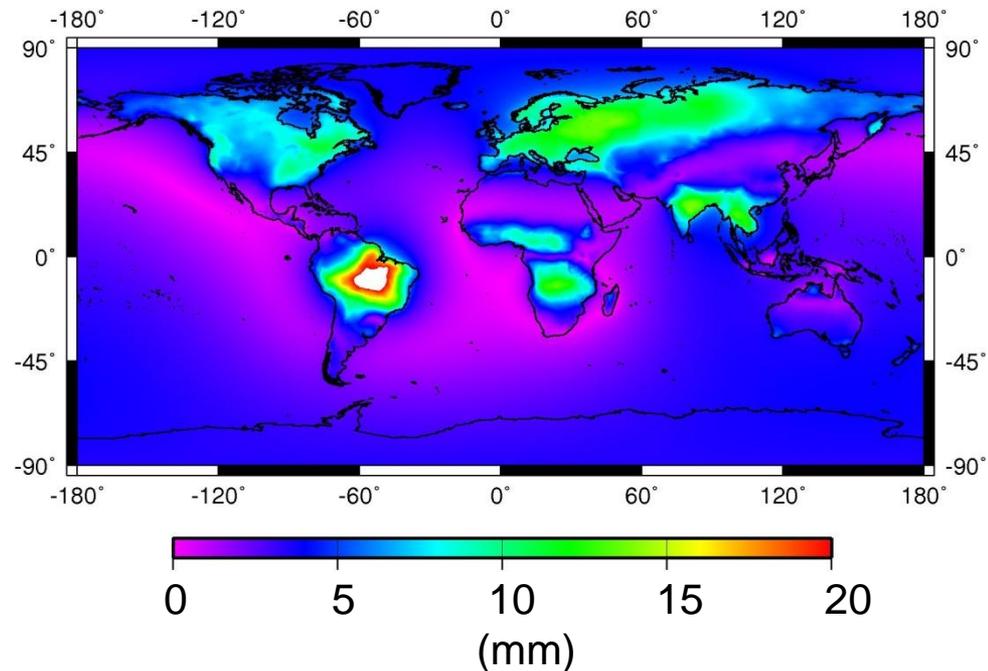
Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales



**Attraction  
newtonienne**

**Amplitude maximale annuelle du  
déplacement vertical**



**Effets élastiques**

(com. pers. J.-P. Boy)

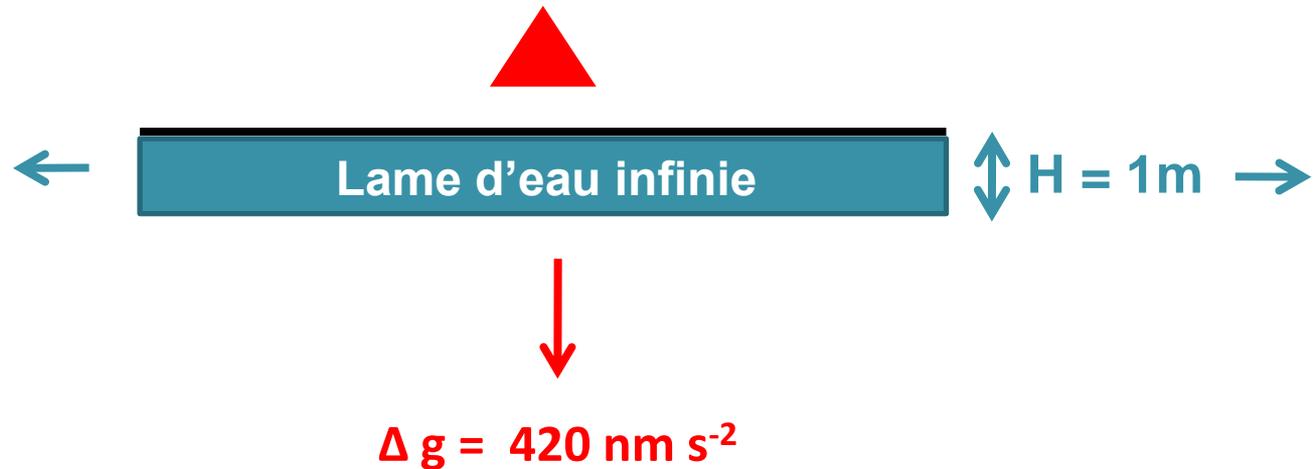
# Hydrogéodésie: effet de plateau



Attraction verticale d'un plateau infini de Bouguer

$$\Delta g = 2 \pi G \rho H$$

C'est l'effet maximal obtenu pour une charge d'épaisseur H



Unités:  $1 \mu\text{Gal} = 10 \text{ nm s}^{-2} \approx 10^{-9} \text{ g}$

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Hydrogéodésie: sensibilité spatiale



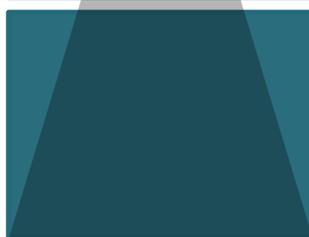
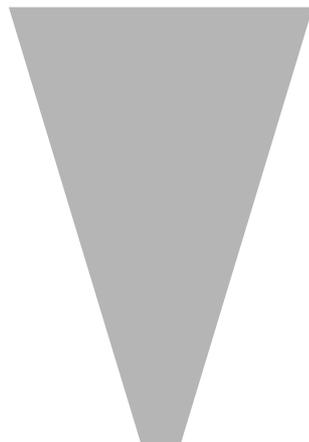
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

Apport de  
masse :  
 $\Delta g < 0$

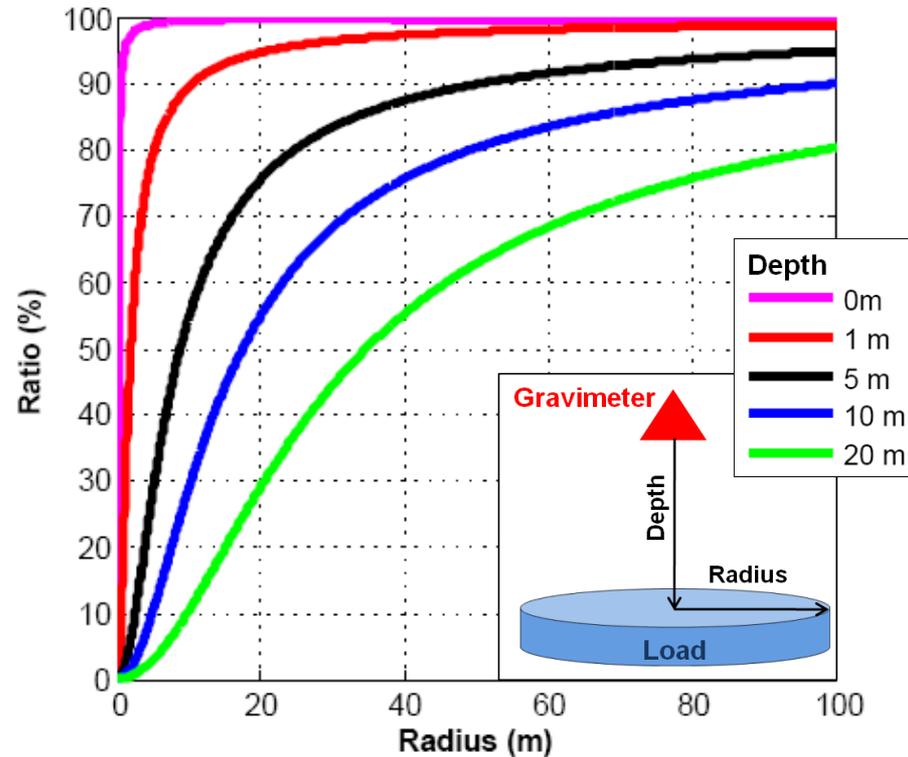


Eaux de  
surface

Humidité  
du sol

Aquifère

Apport de  
masse :  
 $\Delta g > 0$



Variation de la gravité pour une charge de rayon croissant, située à différentes profondeurs, et exprimée en pourcentage de l'effet de plateau.

# Hydrogéodésie: notions d'échelles spatiales



	Local	~ 1 km	Régional	~ 100 km	Continental
Attraction newtonienne	<b>Significatif</b>		<b>Négligeable</b>		<b>Significatif</b>
Effets élastiques	<b>Négligeable</b>		<b>Négligeable</b>		<b>Significatif</b>

Effets de l'hydrologie sur la gravité pour différentes distances  
autour d'un point d'observation

(Llubes et al., 2004)

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Hydrogéodésie: mesures de la gravité



Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

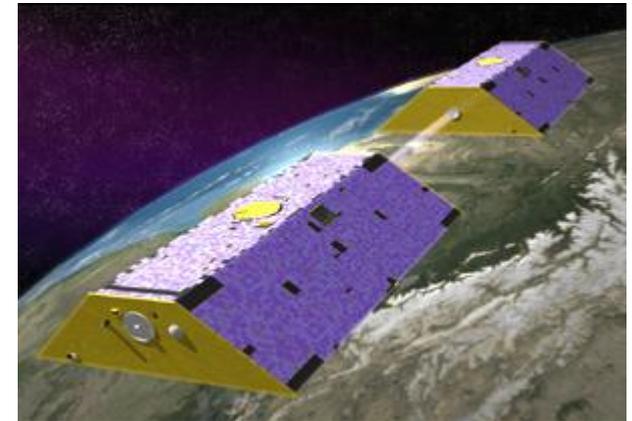
Variations  
spatiales



**Gravimètre absolu  
(FG5)**

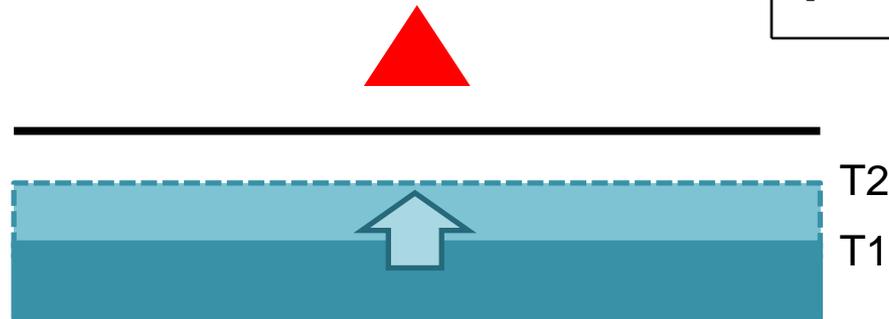
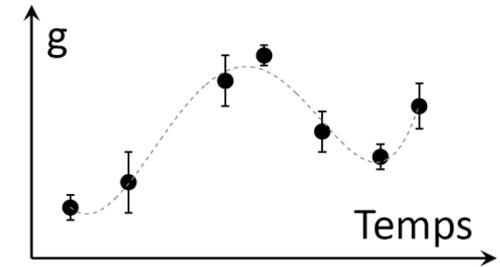


**Gravimètre relatif  
de terrain  
(Scintrex CG5)**



**Satellites GRACE  
(Gravity Recovery and  
Climate Experiment)**

# Stratégies d'observations: Chroniques de gravimétrie absolue



## Pour

- Suivi de l'évolution temporelle des processus hydrologiques
- Pas de dérive instrumentale

## Contre

- Faible couverture spatiale
- Complexité de la mesure

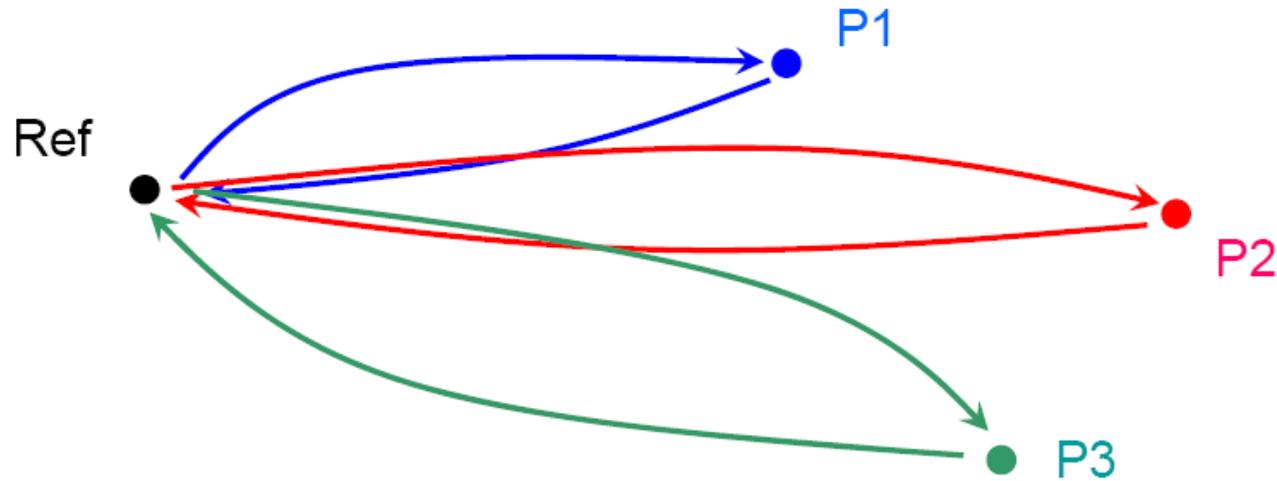
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Stratégies d'observations: Réseaux microgravimétriques



## Pour

- Amélioration de la couverture spatiale
- Simplicité de la mesure

## Contre

- Nécessité d'un point de référence
- Stratégie coûteuse en temps: terrain & traitement

Sahel

Hydro-  
géodésie

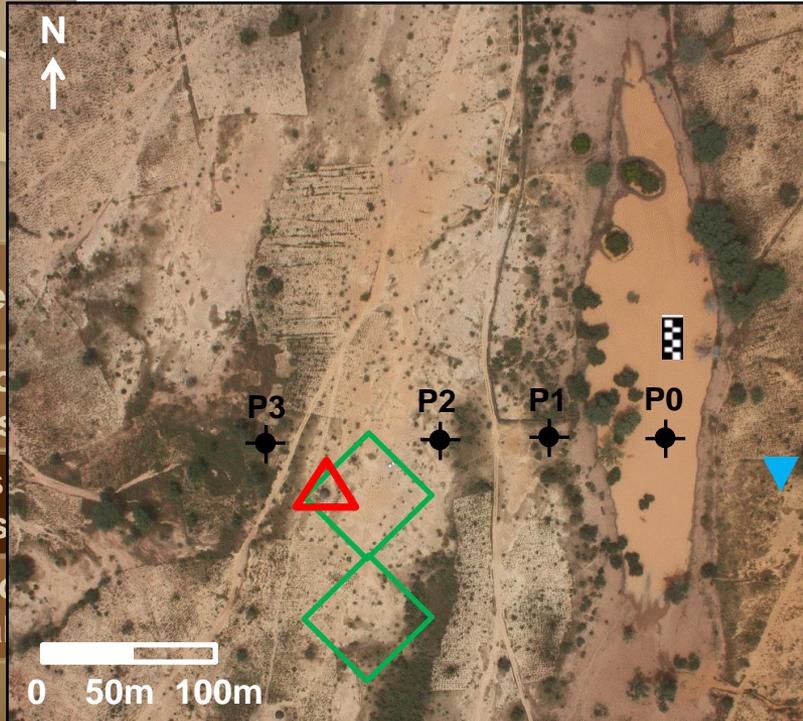
Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales



**ANALYSE DE DEUX  
CYCLES DE MOUSSON  
(2008-2009)**

# Cycles de mousson: le site instrumental de Wankama



The soil moisture measurement sites



- △ Absolute gravimeter hut
- ◇ MRS loop (2008/2009)
- Piezometer stage recorder
- ▣ Pond stage recorder
- ▼ Automatic rain gauge

The gravimetric  
measurement site

# Cycles de mousson: hypothèse de travail



**Les variations temporelles de la gravité, une fois corrigées des effets géodynamiques connus, traduisent des variations de stock d'eau.**

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

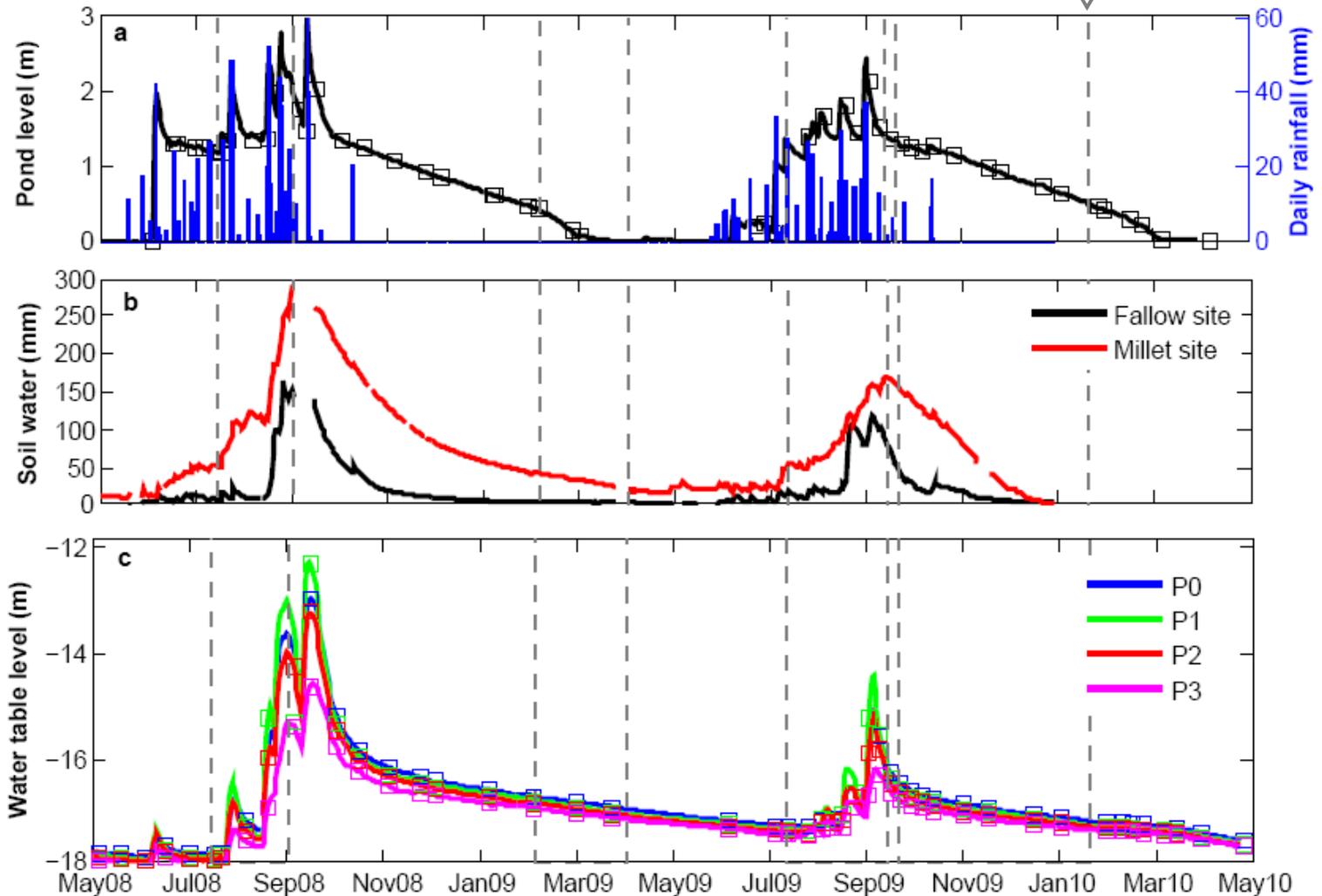
Variations  
spatiales

- **Modèle des stocks d'eau locaux**
  - Effet de la mare
  - Effet de la nappe
  - Effet de la zone non saturée  
(ZNS = interface triphasique entre la surface et la nappe)
- **Effets hydrologiques globaux**
  - Modèles hydrologiques globaux
  - Variations temporelles de la gravité dérivées des satellites GRACE

# Cycles de mousson: données hydrodynamiques



Absolute gravimetric measurement dates



Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

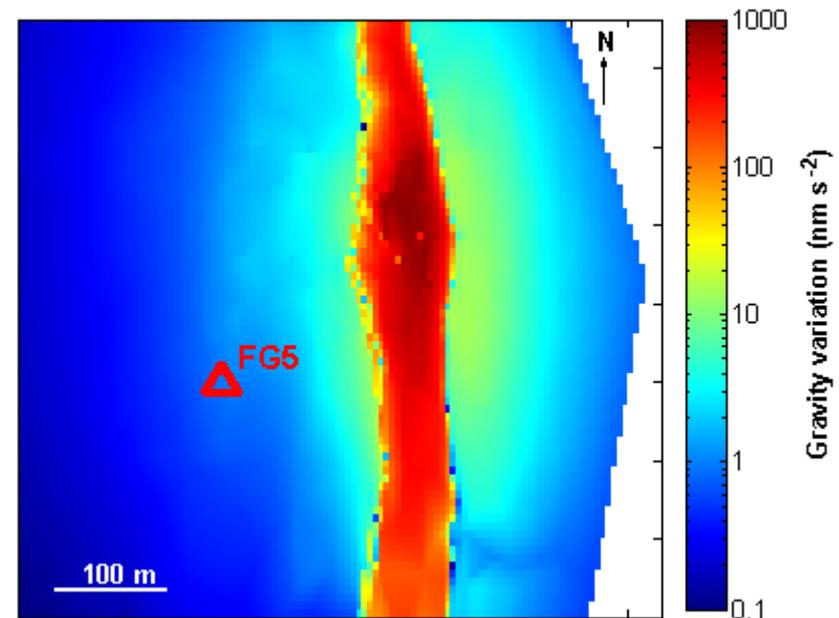
Variations spatiales

# Cycles de mousson: effets hydrologiques locaux



Photos communiquées par M. Boucher

- Variations de gravité dues au remplissage de la mare → **négligeables** à la case FG5



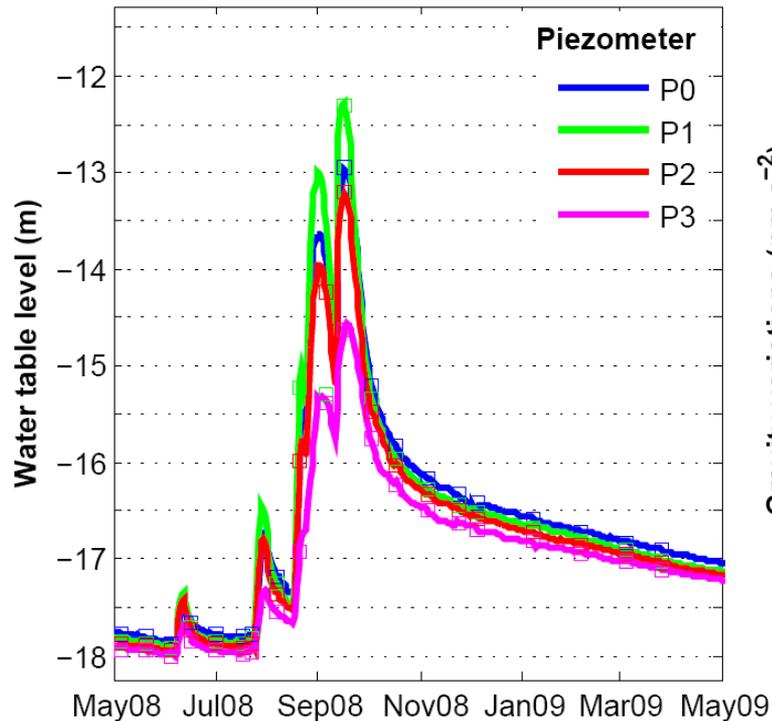
Variations de la gravité dues au remplissage de la mare (+ 3 m)

# Cycles de mousson: effets hydrologiques locaux

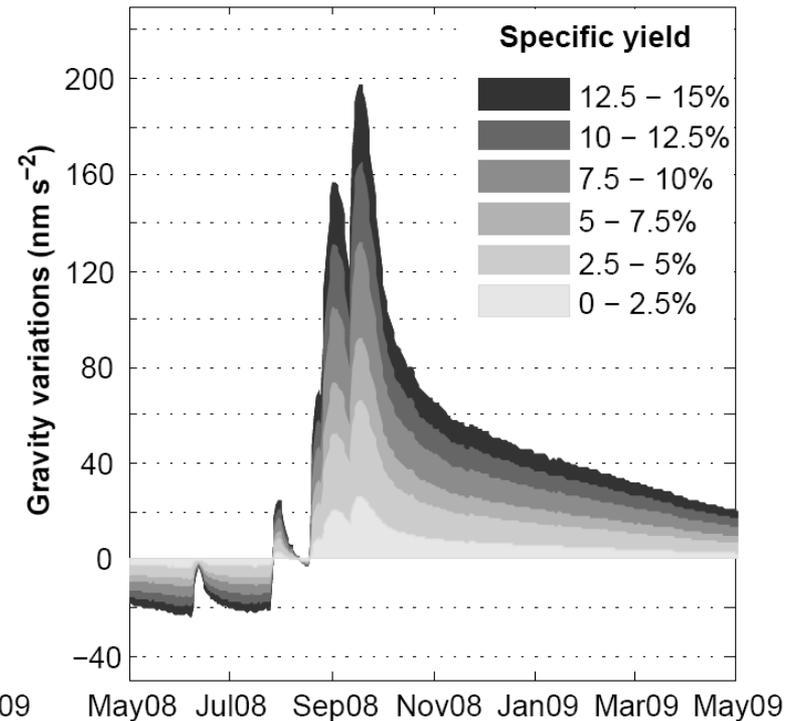


- Variations de gravité dues au battement de la **nappe** proportionnelles à la **porosité de drainage**

Water table fluctuation



Simulated newtonian attraction at the FG5 hut



Sahel

Hydro-géodésie

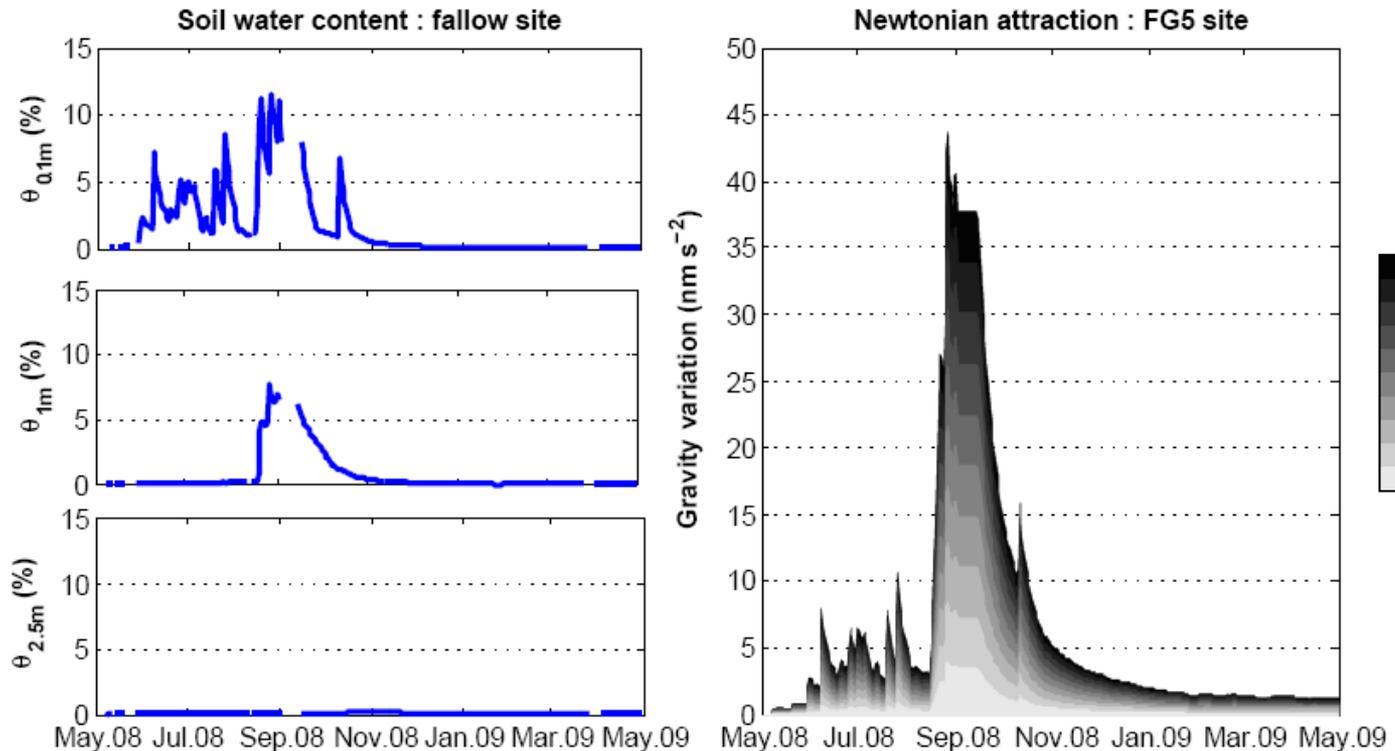
Cycles de mousson

Variations spatiales

# Cycles de mousson: effets hydrologiques locaux



- Variations de gravité dues aux **variations d'humidité dans la zone non saturée** à la case FG5  $\leq$  au site de jachère



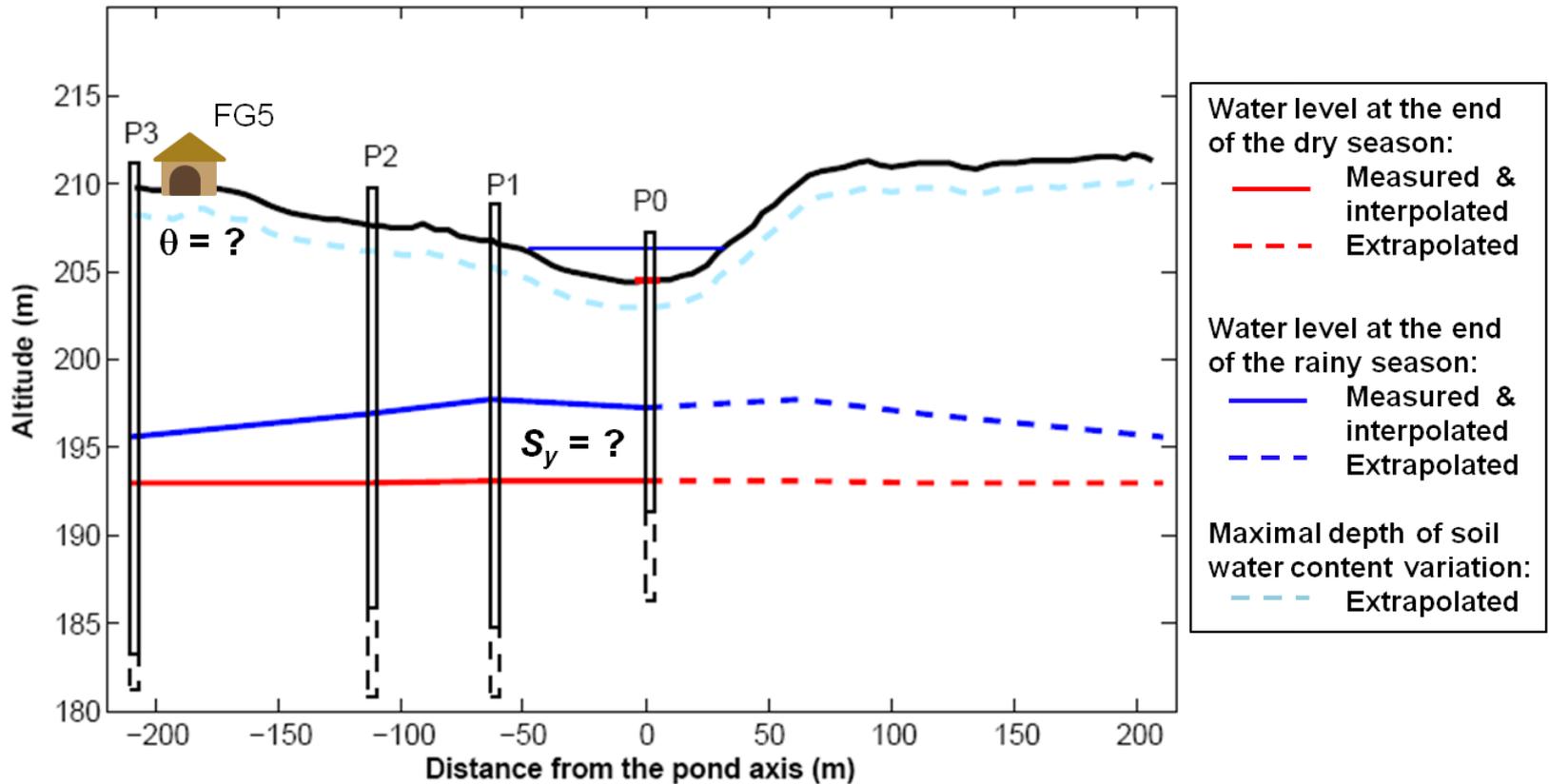
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Cycles de mousson: effets hydrologiques locaux



**Modèle des variations saisonnières des stocks d'eau locaux pris en compte pour le calcul de la réponse gravimétrique associée au site de Wankama**

Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

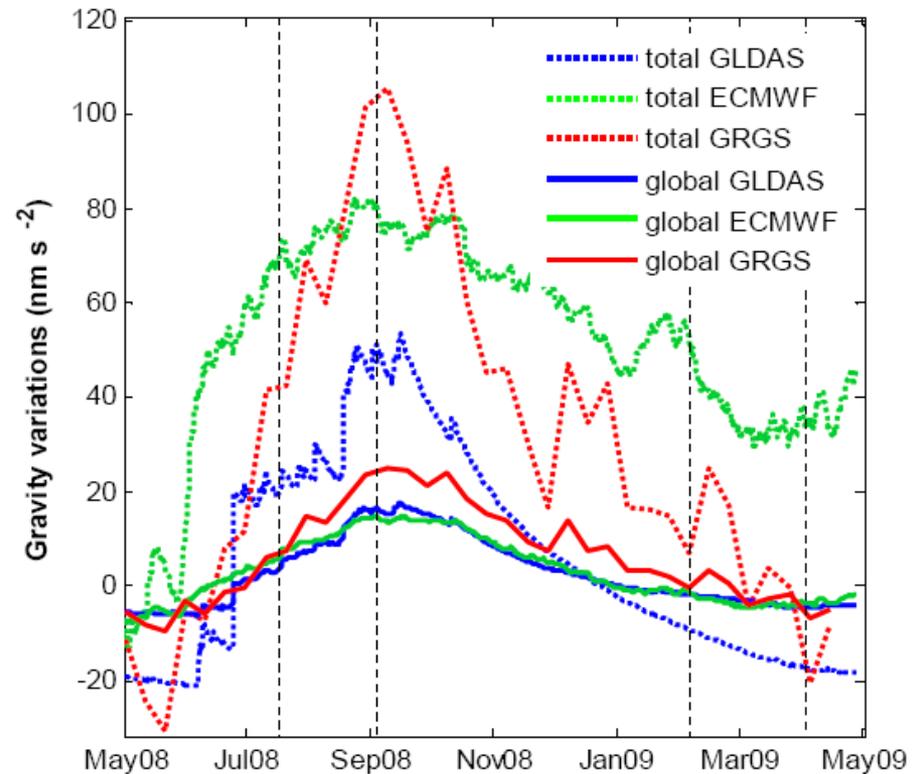
Variations spatiales

# Cycles de mousson: effets hydrologiques globaux



	GLDAS	ECMWF	GRACE (GRGS)
<b>Estimate</b>	Soil water content	Soil water content	Gravity field
<b>Time resolution</b>	3 h	6 h	10 d
<b>Spatial resolution</b>	25 km	25 km	400 km
<b>Coverage</b>	90 N 60 S	Global	Global

Données utilisées pour le calcul de la contribution hydrologique globale



Contribution hydrologique globale au signal gravimétrique

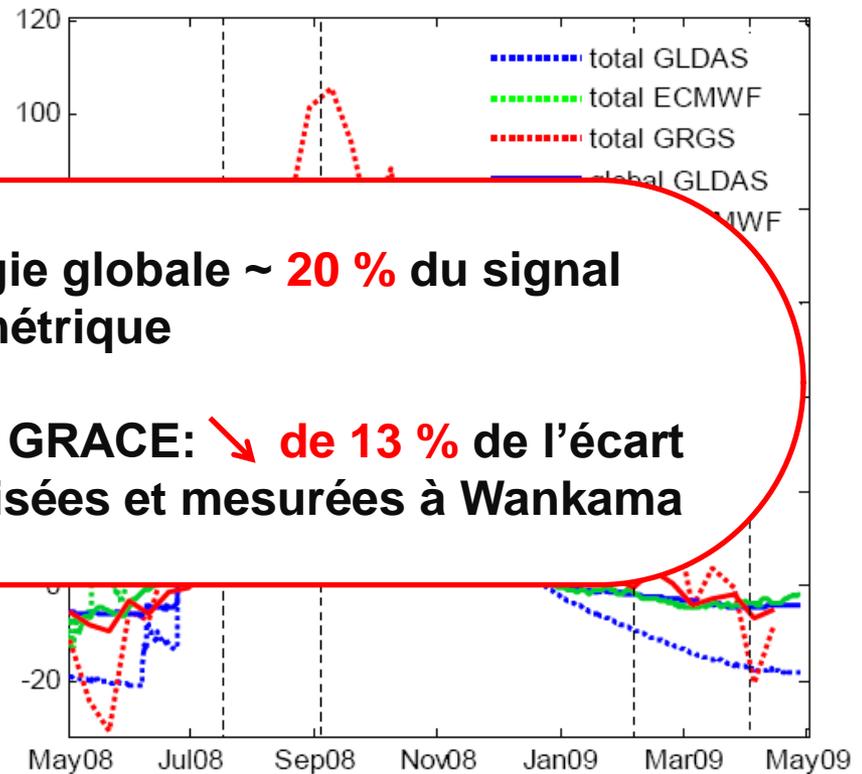
# Cycles de mousson: effets hydrologiques globaux



	GLDAS	ECMWF	GRACE (GRGS)
E			
I			
D			
cover			

**Contribution de l'hydrologie globale ~ 20 % du signal gravimétrique**

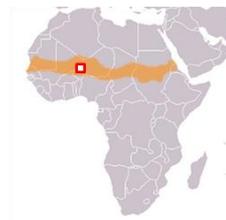
**Application d'une correction GRACE: ↘ de 13 % de l'écart type entre les valeurs modélisées et mesurées à Wankama**



Données utilisées pour le calcul de la contribution hydrologique globale

Contribution hydrologique globale au signal gravimétrique

# Cycles de mousson: comparaison des variations modélisées et mesurées de la gravité

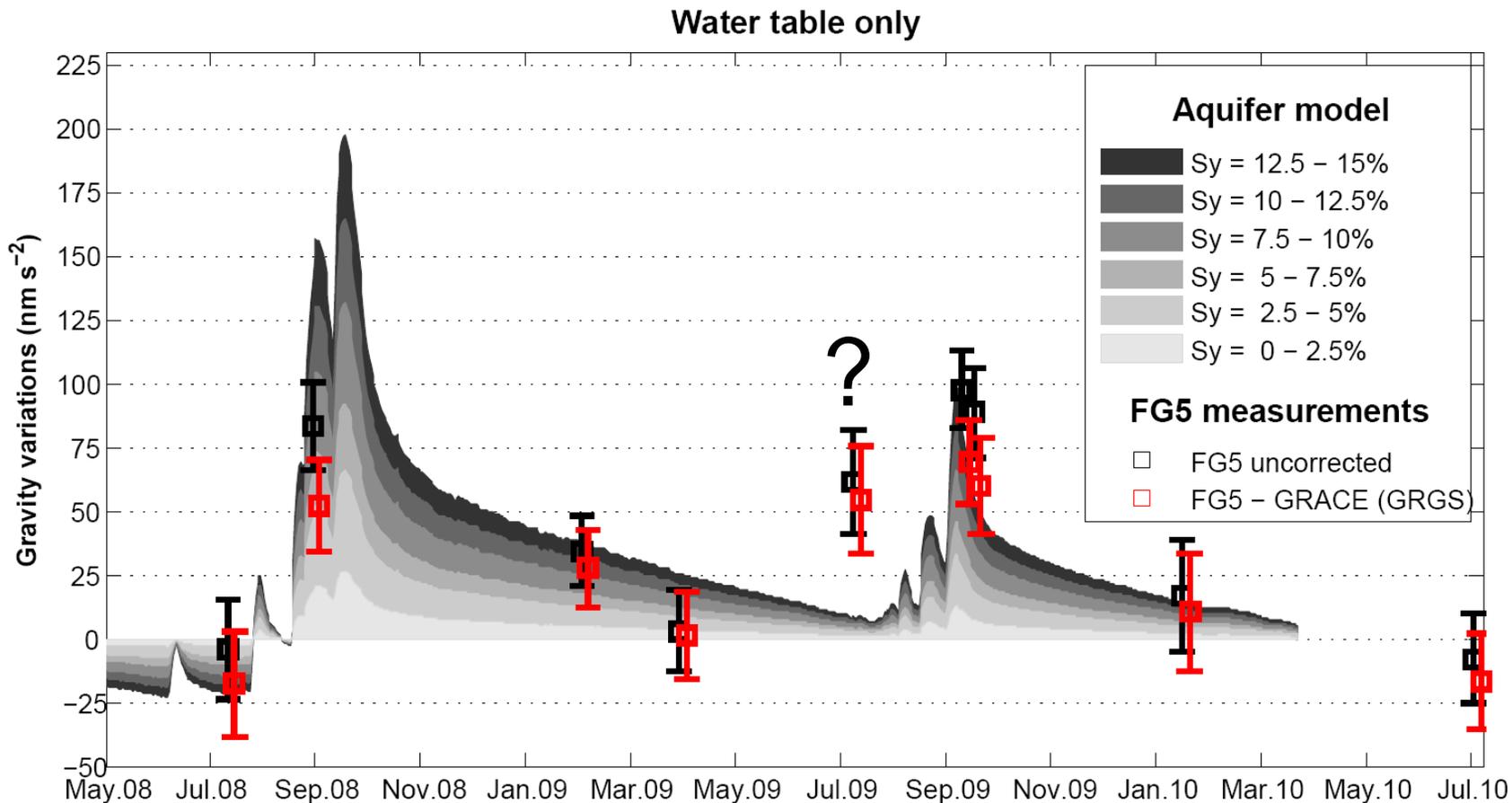


Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

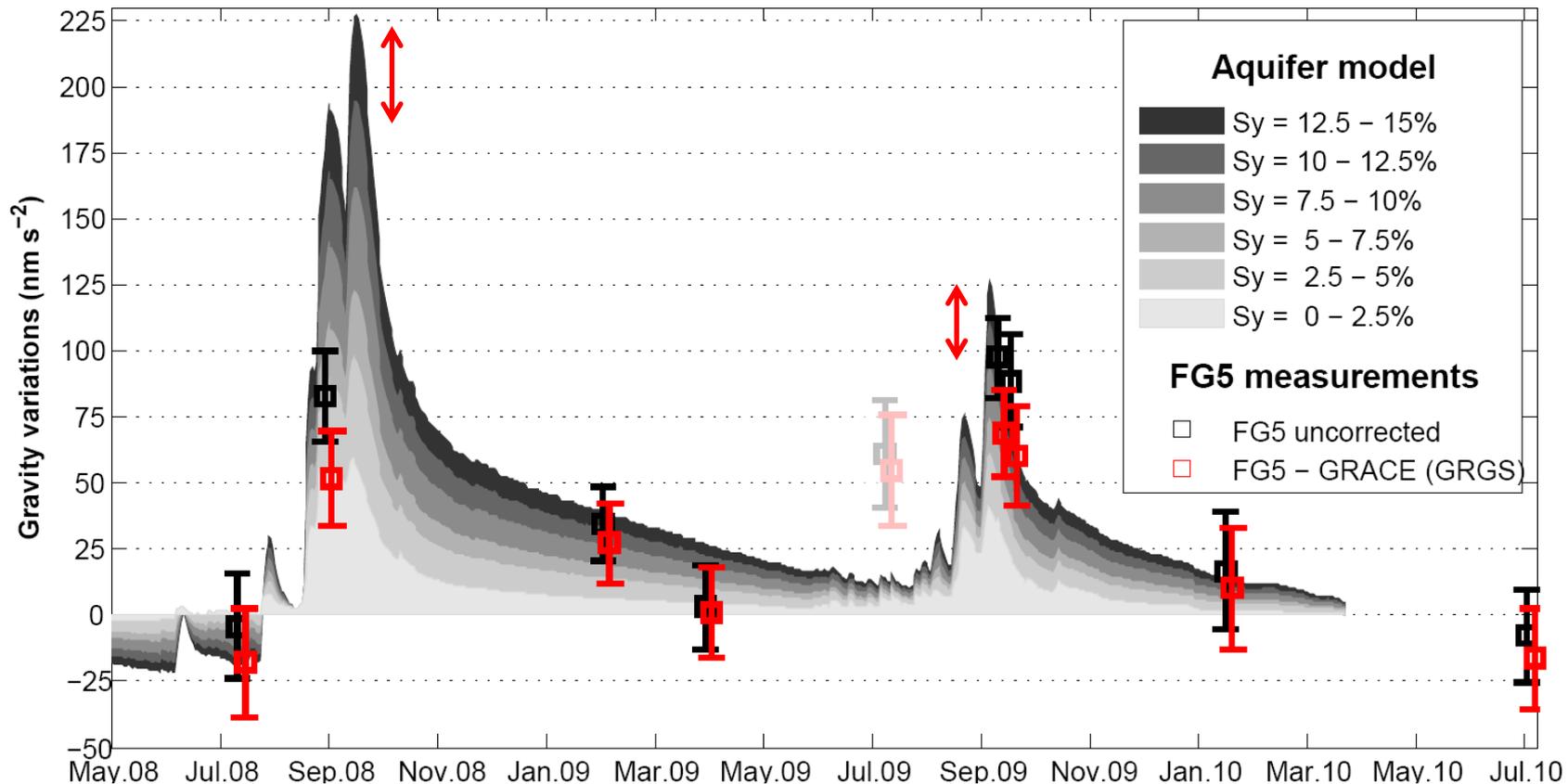
Variations spatiales



# Cycles de mousson: comparaison des variations modélisées et mesurées de la gravité



Water table and maximum soil moisture contribution



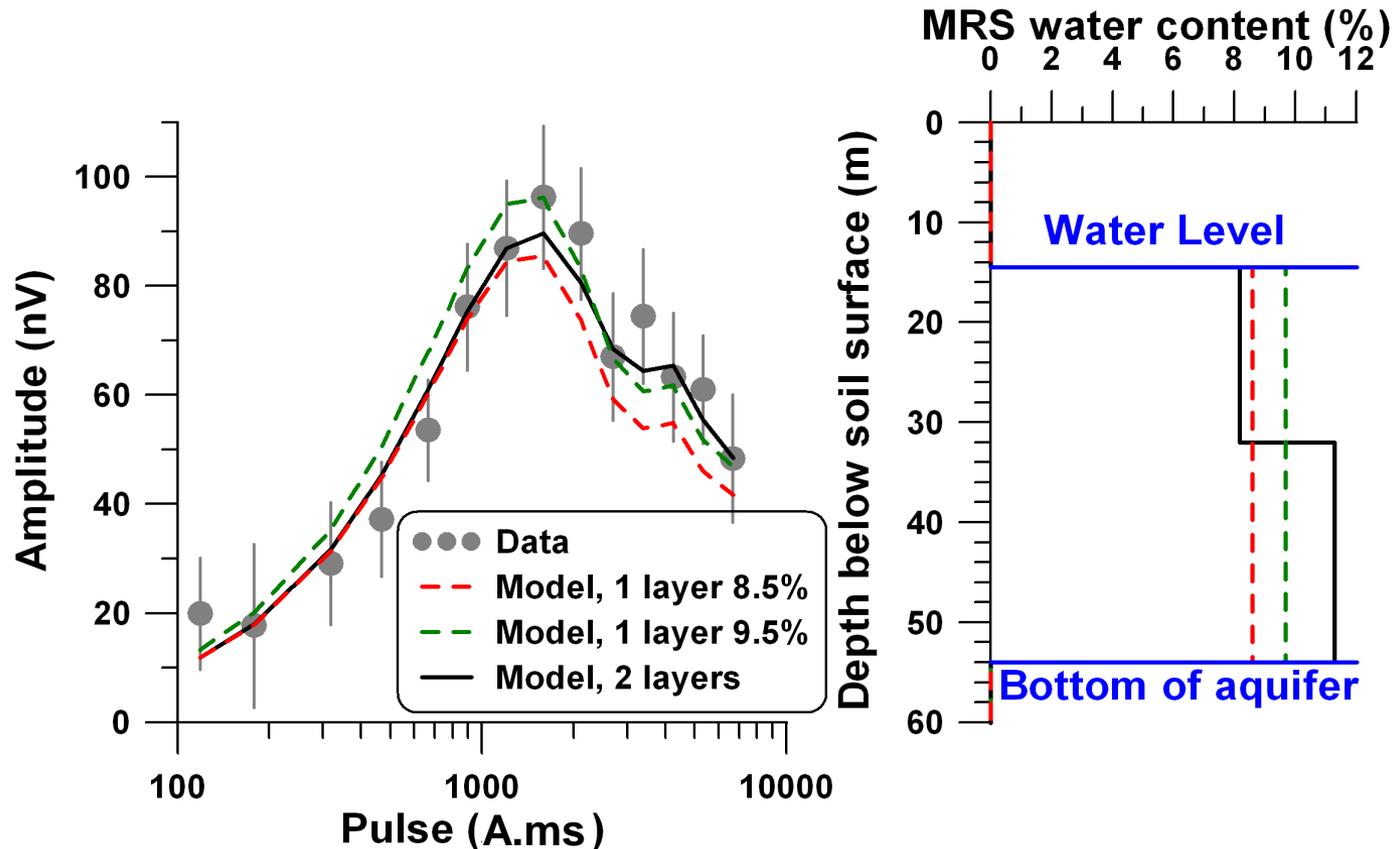
Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

Variations spatiales

# Cycles de mousson: comparaison des porosités de l'aquifère



Comparaison des signaux RMP mesurés et simulés selon 3 modèles différents de contenu en eau dans l'aquifère



## CONCLUSION PARTIELLE

- Apports des chroniques de mesures absolues de la gravité:
  - Quantification des influences de la mousson aux échelles **locales** et **continentales** (~20%)
  - Détermination de la **porosité de drainage** de l'aquifère
  - Bon **accord** entre la **gravimétrie** et la **RMP** malgré leurs sensibilités différentes

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales



## CONCLUSION PARTIELLE

- Apports des chroniques de mesures absolues de la gravité:
  - Quantification des influences de la mousson aux échelles **locales** et **continentales** (~20%)
  - Détermination de la **porosité de drainage** de l'aquifère
  - Bon **accord** entre la **gravimétrie** et la **RMP** malgré leurs sensibilités différentes

### Mais ....

- **Peu de données** pour évaluer les variations saisonnières des stocks d'eau
- Rôle de la **zone non saturée?**

Sahel

Hydro-  
géodésie

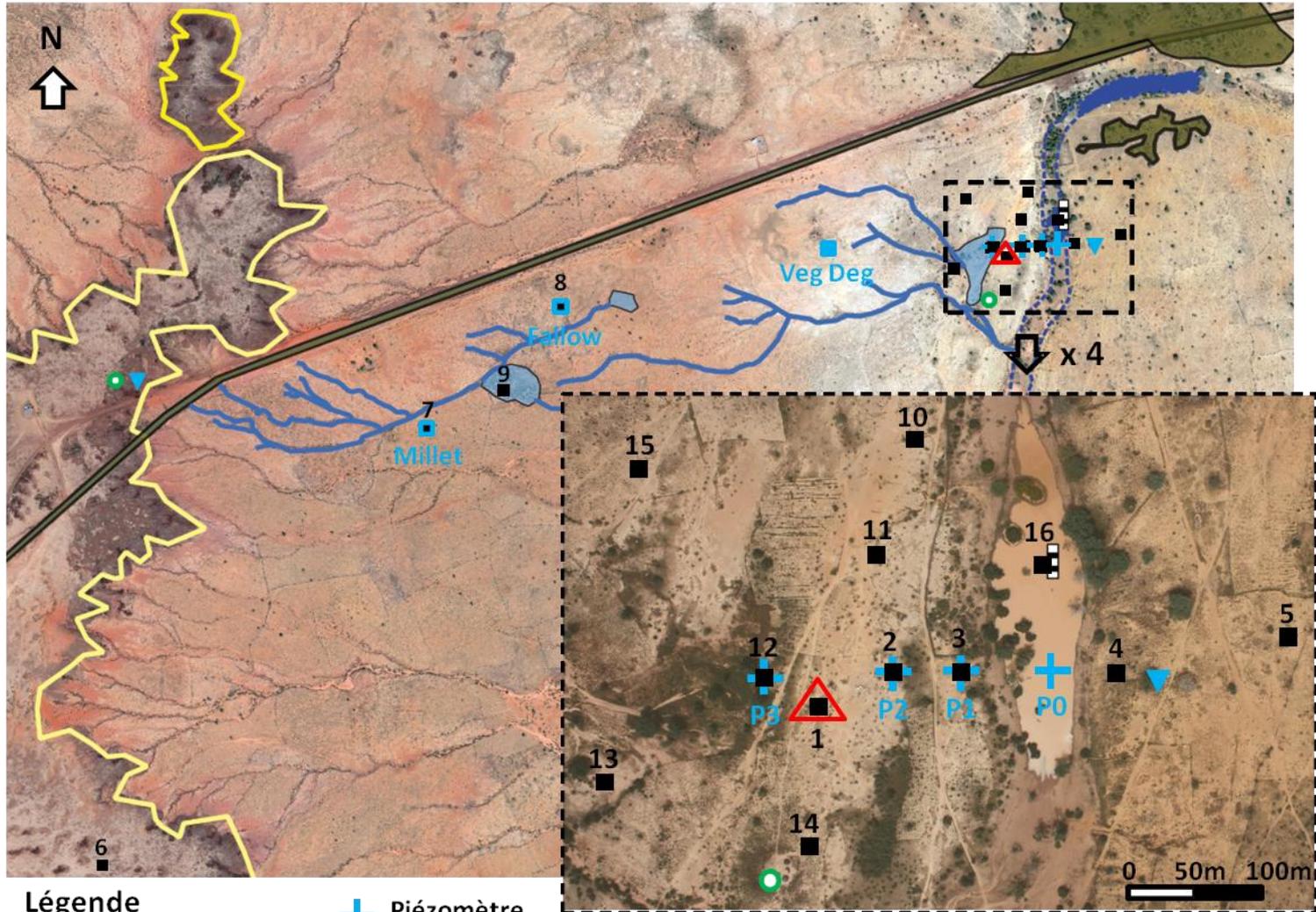
Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales



**VARIABILITE SPATIALE  
DES STOCKS D'EAU  
(MOUSSON 2009)**

# Le réseau de microgravimétrie



## Légende

- |                      |   |                       |   |
|----------------------|---|-----------------------|---|
| ■ Station CG5        | + | ■ Village de Wankama  | ⋮ |
| ▲ FG5, référence CG5 | ■ | ■ Plateau latéritique | ■ |
| ● Station GPS        | ▼ | ■ Mare                | — |
|                      | ⊞ |                       |   |

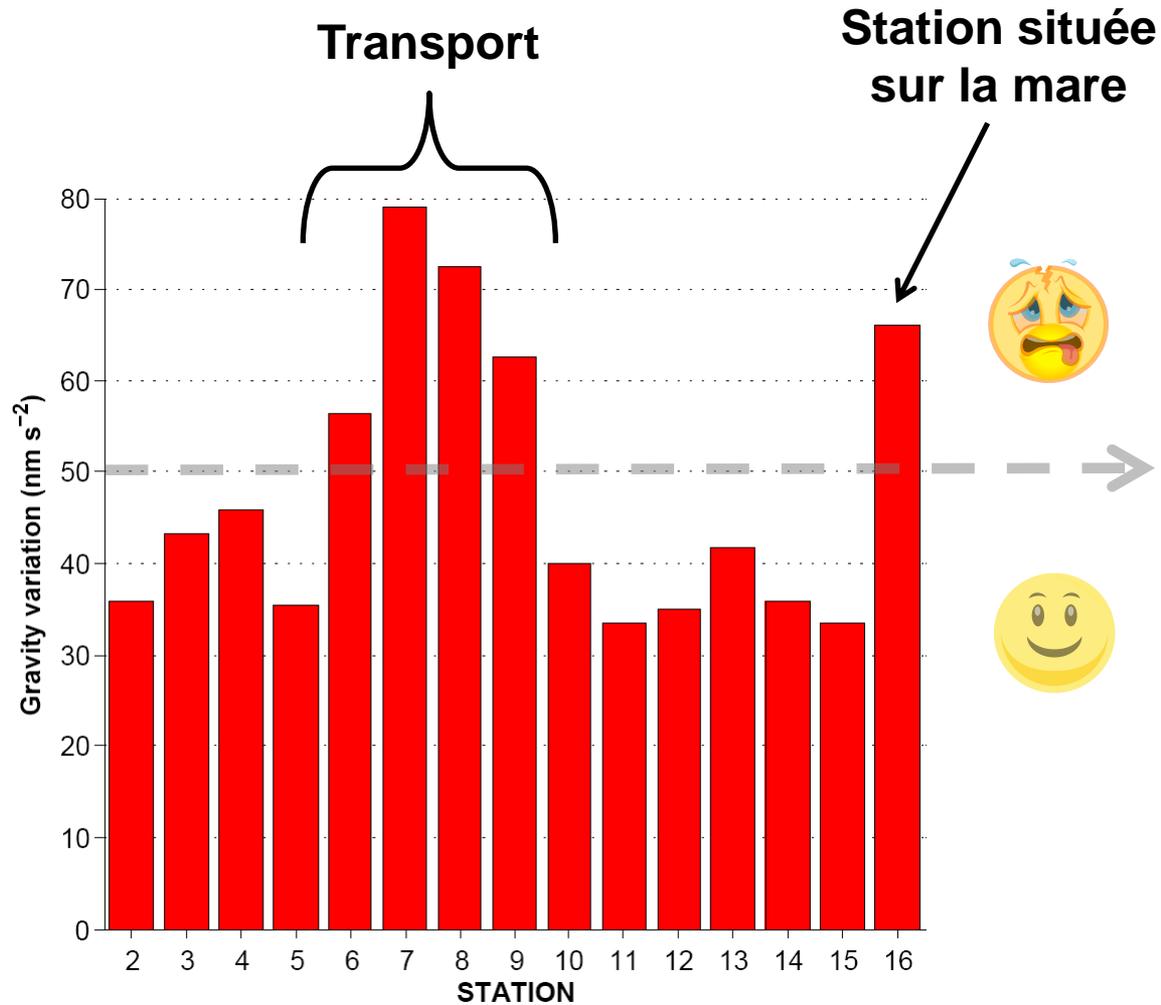
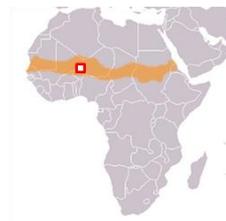
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Incertitudes sur les mesures



**Incertitudes moyennes par station  
calculées sur l'ensemble de la mission**

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Expression des données de microgravimétrie



- Doubles différences

$$Dg_{x-x_0}^{t-t_0} = \left( g_x - g_{x_0} \right)_t - \left( g_x - g_{x_0} \right)_{t_0}$$

Mesure temps  $t$ , station  $x - x_0$       Mesure temps  $t_0$ , station  $x - x_0$

Info. statique      Info. statique

→ Double différence de gravité ( $g$ ):  
→ Spatiale: station  $x -$  station  $x_0$  (référence)  
→ Temporelle: temps  $t -$  temps  $t_0$

Info. sur la variation des stocks d'eau

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Interprétation des doubles différences de gravité



- **Hypothèse:** les variations résiduelles de gravité dans le temps sont dues aux variations des stocks d'eau

- **Doubles différences:**

$$Dg_{x-x_0}^{t-t_0} > 0$$

$$(g_x - g_{x_0})_t > (g_x - g_{x_0})_{t_0}$$

$$(g_x)_{t-t_0} > (g_{x_0})_{t-t_0}$$

- **Entre les temps t et t<sub>0</sub>**

*stockage (station x) > stockage (station x<sub>0</sub>)*

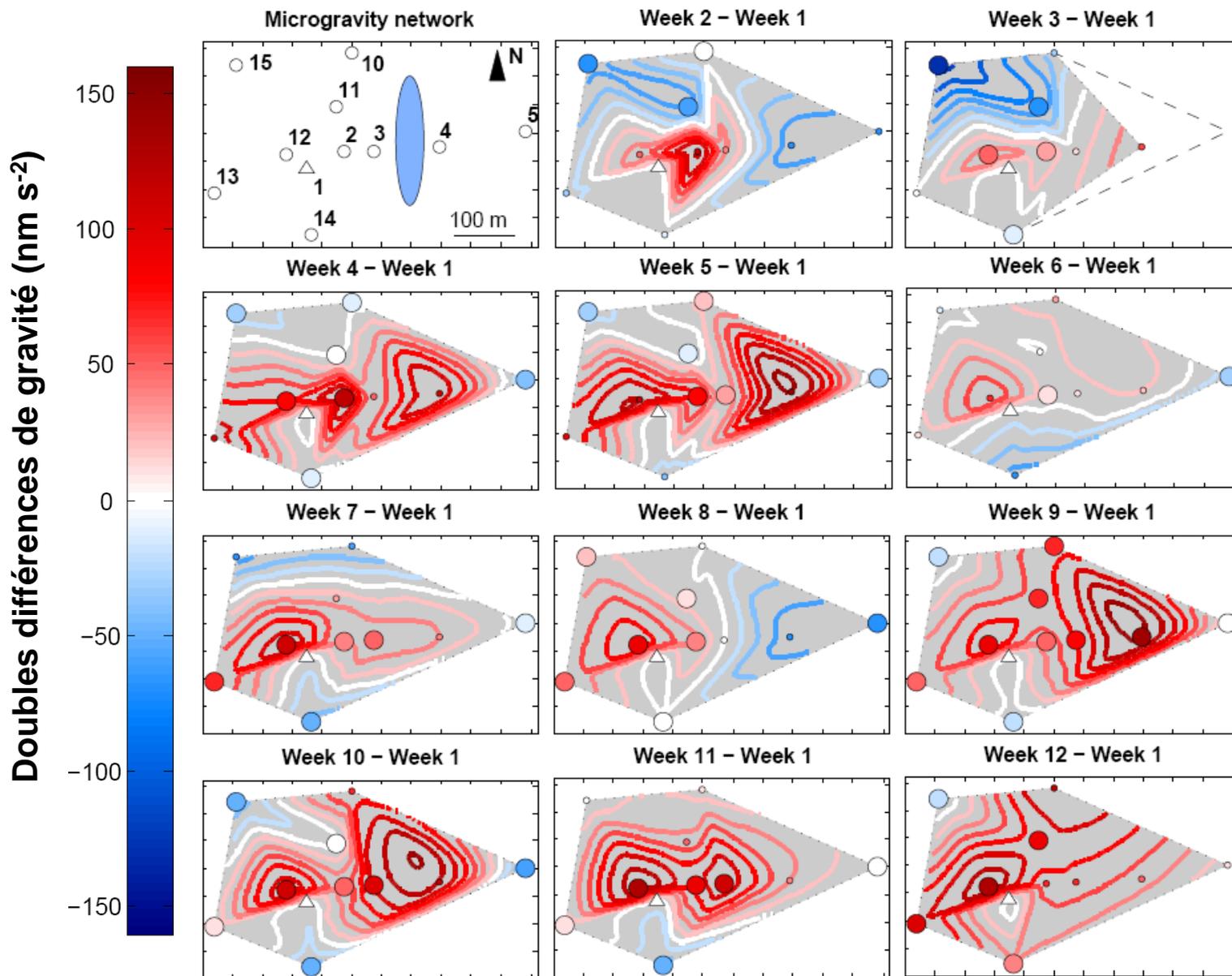
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Cartes des variations de gravité



Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Expression des données de microgravimétrie



- Ecart par rapport à la moyenne des doubles différences

$$Dg_{x-x_0}^{t-t_0} - \overline{Dg_{x-x_0}^{t-t_0}} = (g_x - g_{x_0})_t - (g_x - g_{x_0})_{t_0} - \sum_{i=1}^n \frac{(g_{x_i} - g_{x_0})_t - (g_{x_i} - g_{x_0})_{t_0}}{n}$$

Moyenne des doubles différences

Si  $n$ ,  $t_0$  et  $x_0$  sont fixés,  $\overline{Dg_{x-x_0}^{t-t_0}}$  dépend seulement de  $t$ , et est noté  $\langle \Delta_t G \rangle$ .

Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

Variations spatiales

# Expression des données de microgravimétrie



- **Ecart par rapport à la moyenne des doubles différences**

$$Dg_{x-x_0}^{t-t_0} - \overline{Dg_{x-x_0}^{t-t_0}} = (g_x - \cancel{g_{x_0}})_t - (g_x - \cancel{g_{x_0}})_{t_0} - \sum_{i=1}^n \frac{(g_{x_i} - \cancel{g_{x_0}})_t - (g_{x_i} - \cancel{g_{x_0}})_{t_0}}{n}$$

$$MDg_x^{t-t_0} = \left( g_x - \sum_{i=1}^n \frac{g_{x_i}}{n} \right)_t - \left( g_x - \sum_{i=1}^n \frac{g_{x_i}}{n} \right)_{t_0}$$

**Ecart à la moyenne des doubles différences**

- **Pas de différence par rapport à une station singulière**
- **Expression + représentative des variations spatiales du système**

Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

Variations spatiales

# Interprétation des écarts par rapport à la moyenne des doubles différences



- **Hypothèse:** les variations résiduelles de gravité dans le temps sont dues aux variations des stocks d'eaux
- **Ecarts par rapport à la moyenne des doubles différences:**

$$MDg_x^{t-t_0} > 0$$

$$\left( g_x - \sum_{i=1}^n \frac{g_{x_i}}{n} \right)_t > \left( g_x - \sum_{i=1}^n \frac{g_{x_i}}{n} \right)_{t_0}$$

$$(g_x)_{t-t_0} > \left( \sum_{i=1}^n \frac{g_{x_i}}{n} \right)_{t-t_0}$$

- **Entre les temps t et t<sub>0</sub>**

stockage (station x) > stockage (moy. des stations)

Sahel

Hydro-  
géodésie

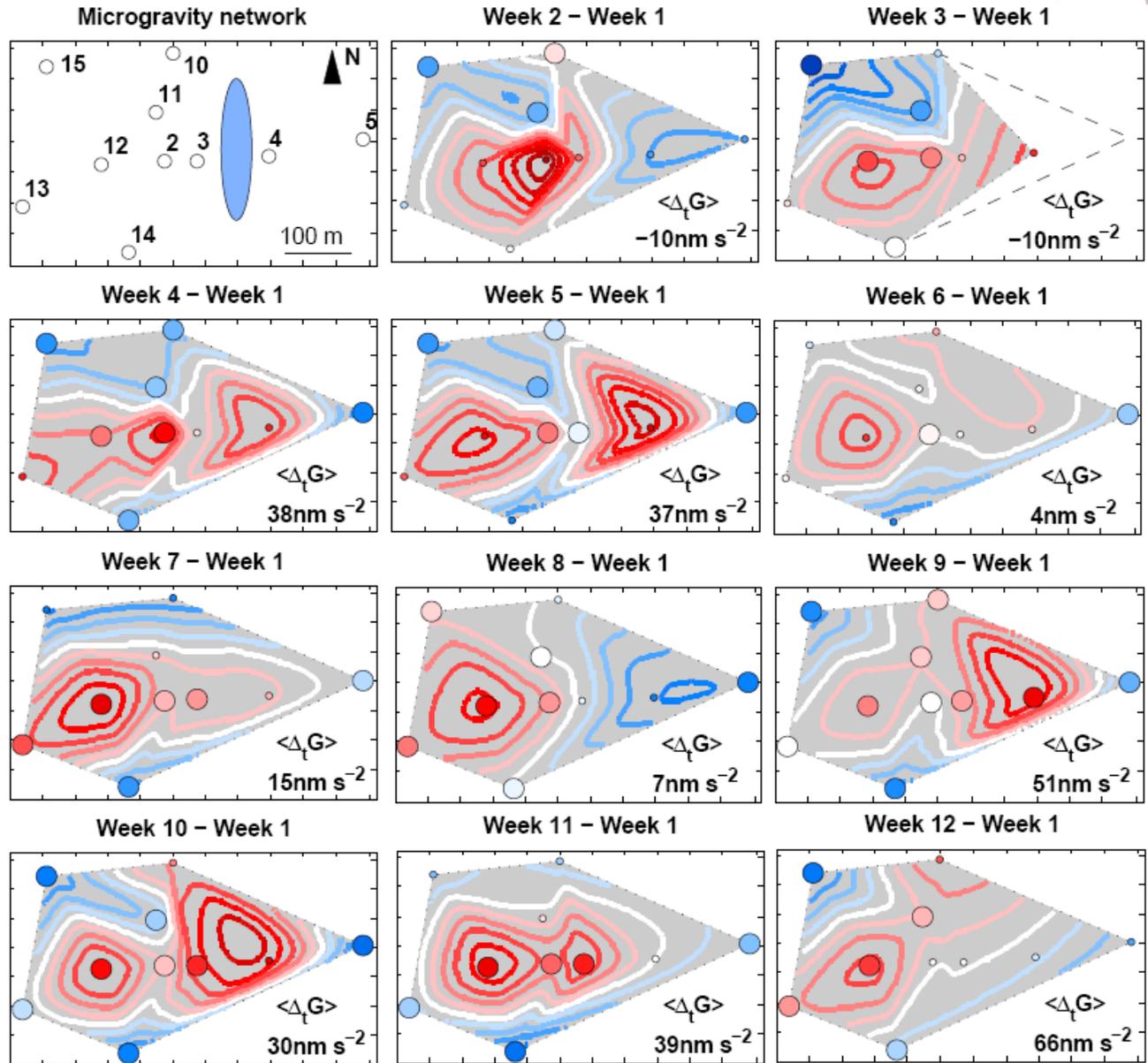
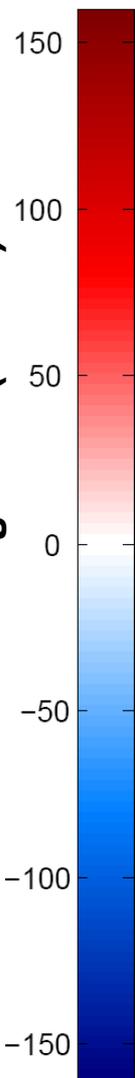
Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Cartes des variations de gravité

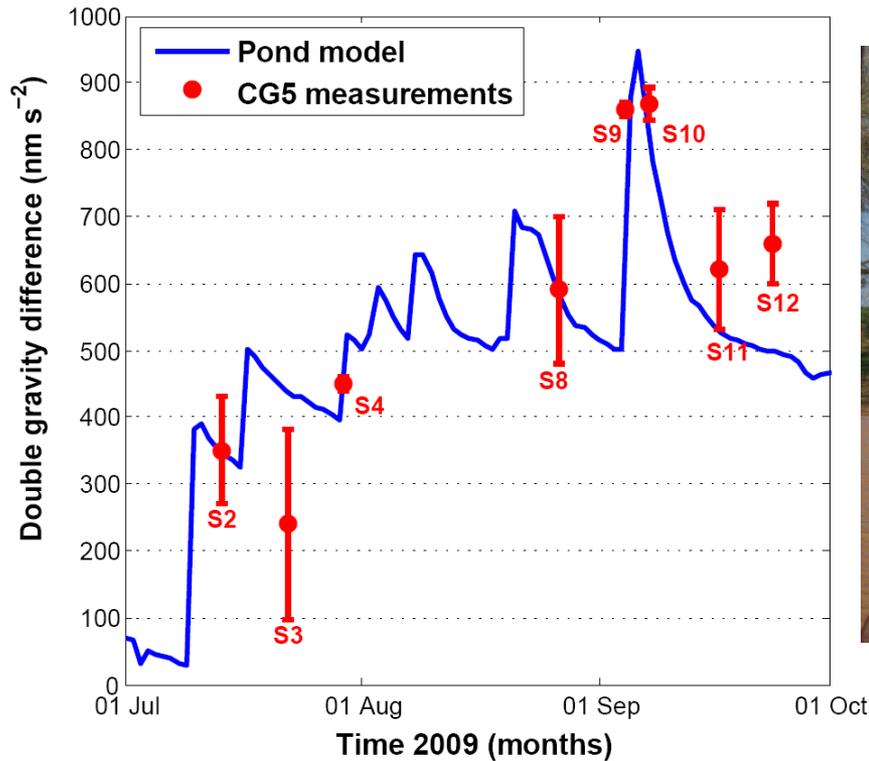


Ecart par rapport à la moyenne des doubles différences de gravité ( $\text{nm s}^{-2}$ )



Sahel  
Hydro-géodésie  
Cycles de mousson  
Variations spatiales

# Origine des variations de gravité: contribution de la mare



Signal gravimétrique modélisé  
à la station mare  $\sim 1000 \text{ nm s}^{-2}$

Conditions de mesure  
(erreur moyenne =  $65 \text{ nm s}^{-2}$ )

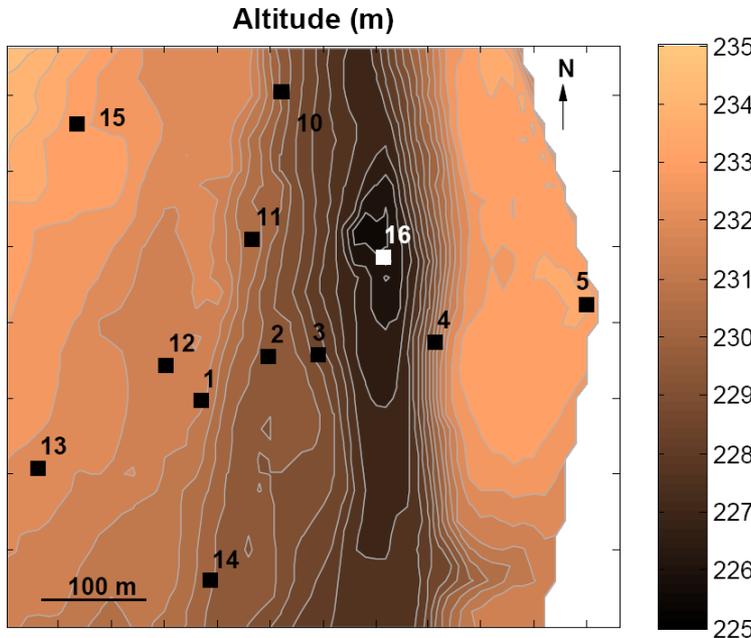
Sahel

Hydro-  
géodésie

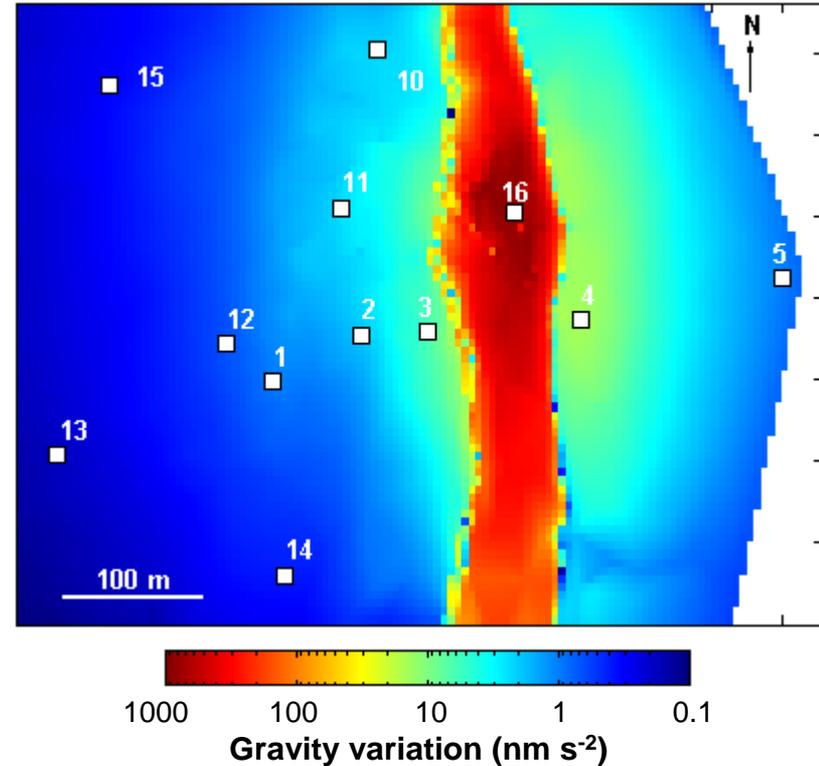
Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Origine des variations de gravité: contribution de la mare



**Modèle numérique de terrain  
(équidistance 1 m)**



**Signal gravimétrique maximal  
modélisé pour toutes les  
stations du réseau**

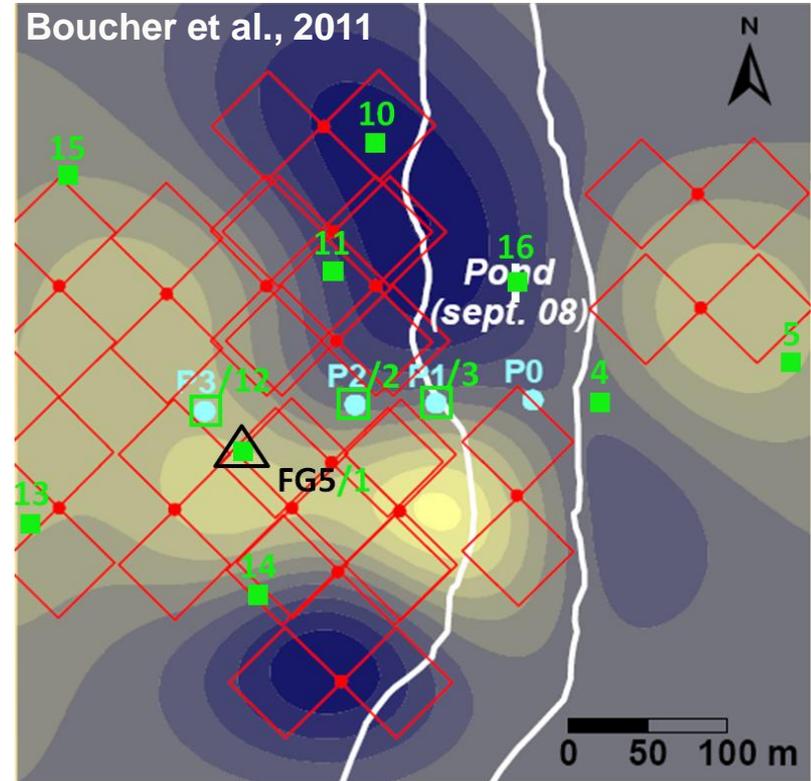
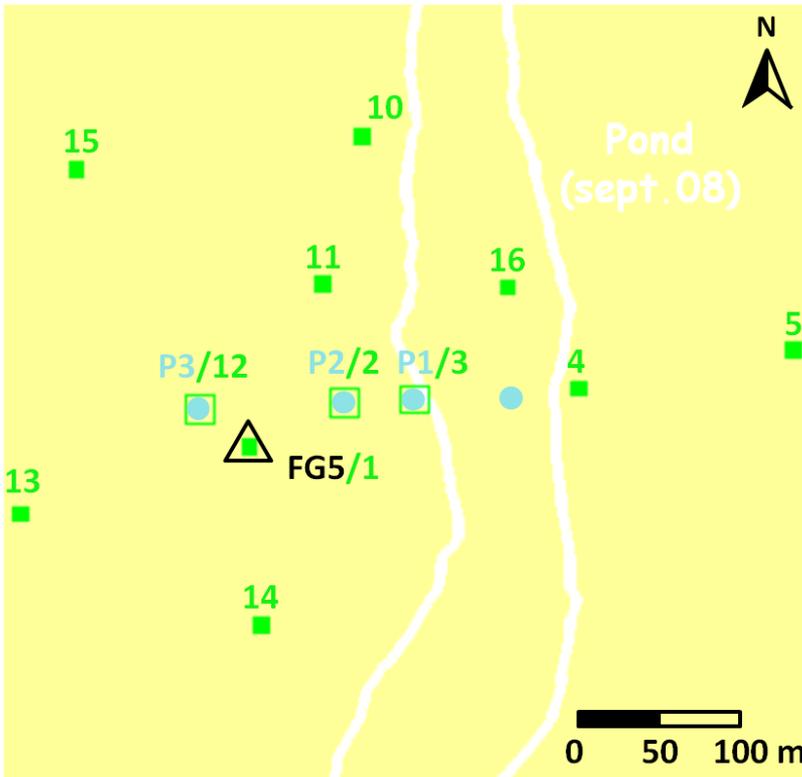
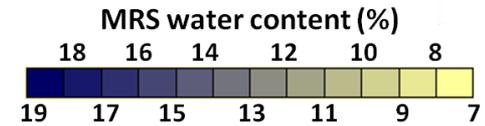
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Origine des variations de gravité: contribution de la nappe



Modèle de nappe à porosité constante ( $S_y = 6\%$ )

Modèle de nappe admettant des hétérogénéités (RMP)

Sahel

Hydro-géodésie

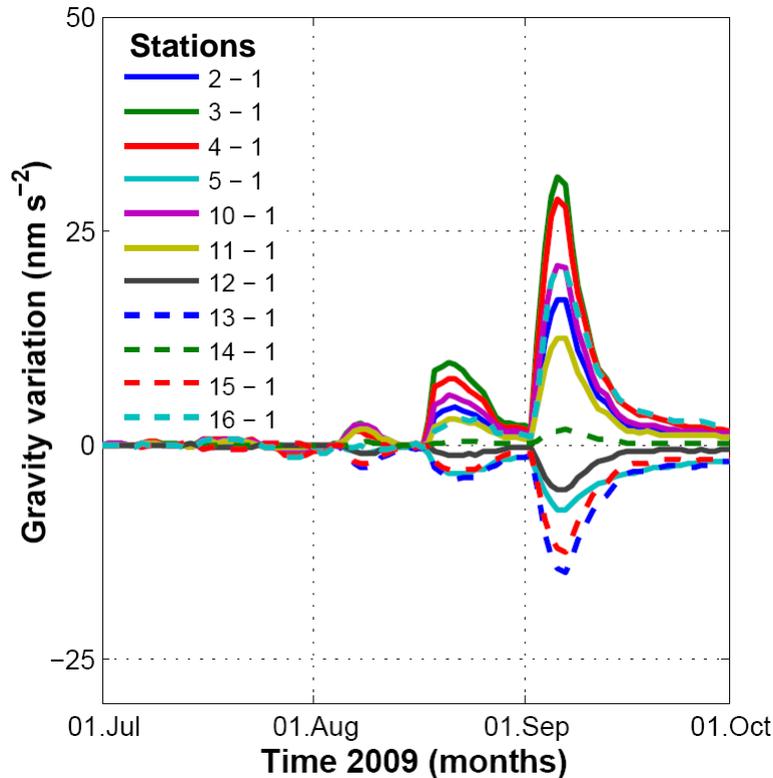
Cycles de mousson

Variations spatiales

# Origine des variations de gravité: contribution de la nappe

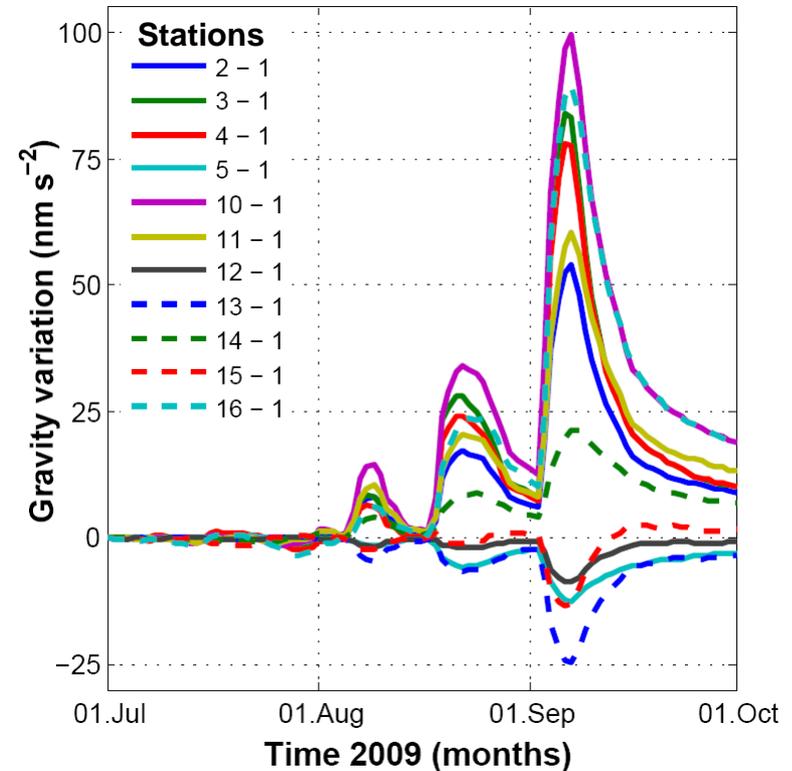


Aquifer model with  $S_y = 6\%$



**Modèle de nappe à porosité  
constante ( $S_y = 6\%$ )**

Aquifer model with  $S_y = \Theta_{\text{MRS}}$



**Modèle de nappe admettant  
des hétérogénéités (RMP)**

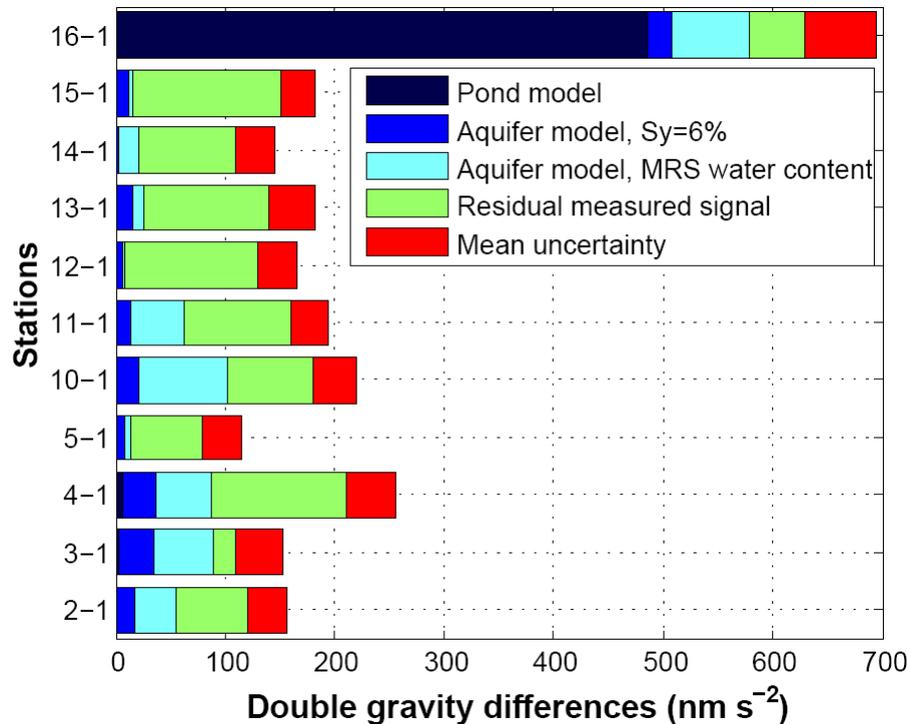
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Origine des variations de gravité: contribution de la zone non saturée?



Contributions maximales modélisées de  
la nappe et de la mare au signal  
gravimétrique total

- Contribution de la **mare**
  - Significative à la station mare
  - Négligeable ailleurs
- Contribution de la **nappe**
  - Modèle à porosité constante: négligeable
  - Modèle à porosité hétérogène: faible à significative
- Une contribution majeure de la **zone non saturée**?

Sahel

Hydro-  
géodésie

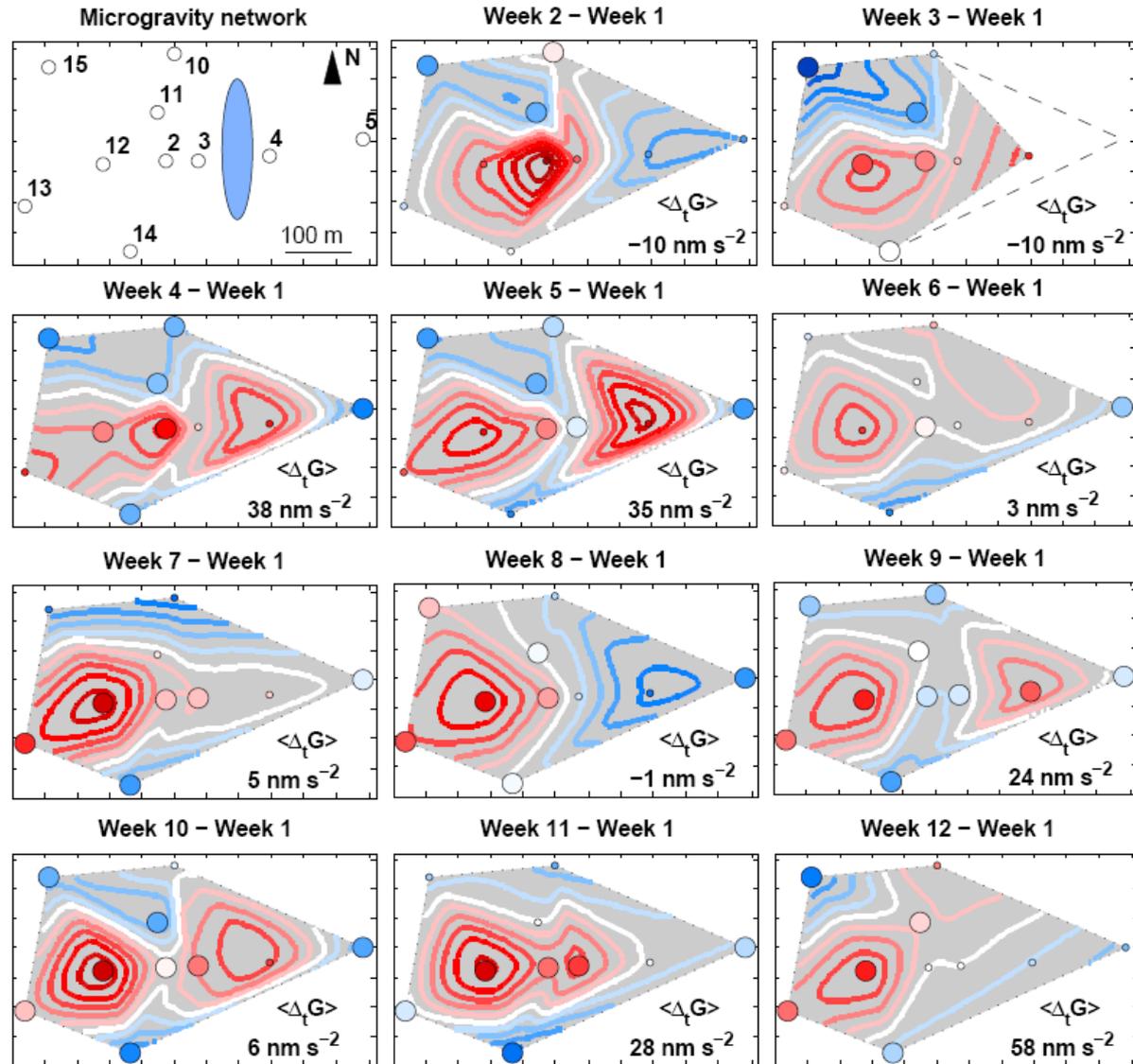
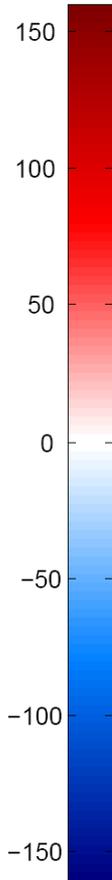
Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Origine des variations de gravité: contribution de la zone non saturée?



Ecart par rapport à la moyenne des doubles  
différences de gravité ( $\text{nm s}^{-2}$ )



Cartes corrigées des effets de la mare et de la nappe

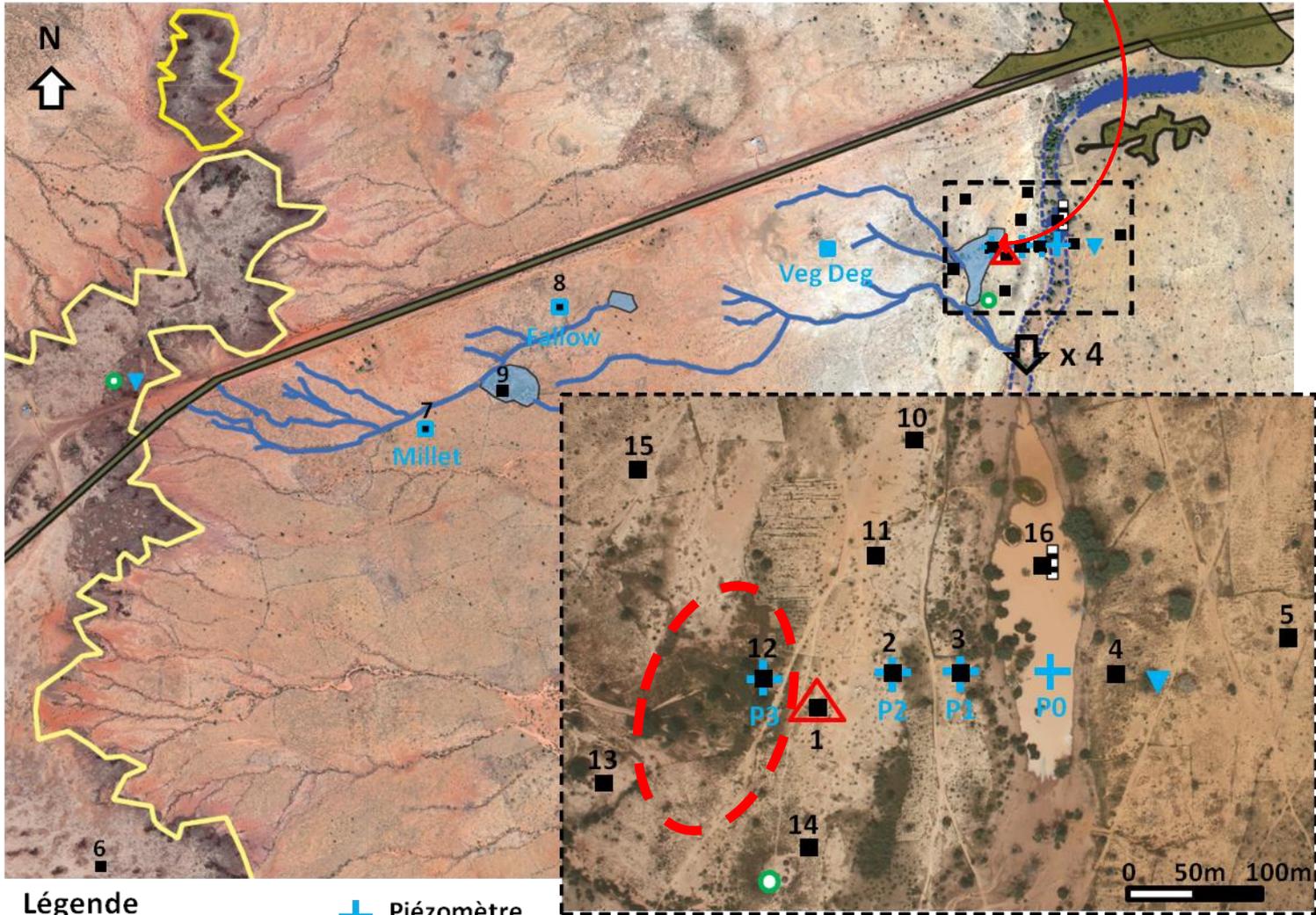
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Signal à l'exutoire d'une ravine



## Légende

- |                      |   |                       |   |
|----------------------|---|-----------------------|---|
| ■ Station CG5        | + | ■ Village de Wankama  | ⋮ |
| ▲ FG5, référence CG5 | ■ | ■ Plateau latéritique | ■ |
| ● Station GPS        | ▼ | ■ Mare                | — |
|                      | ⋮ |                       |   |

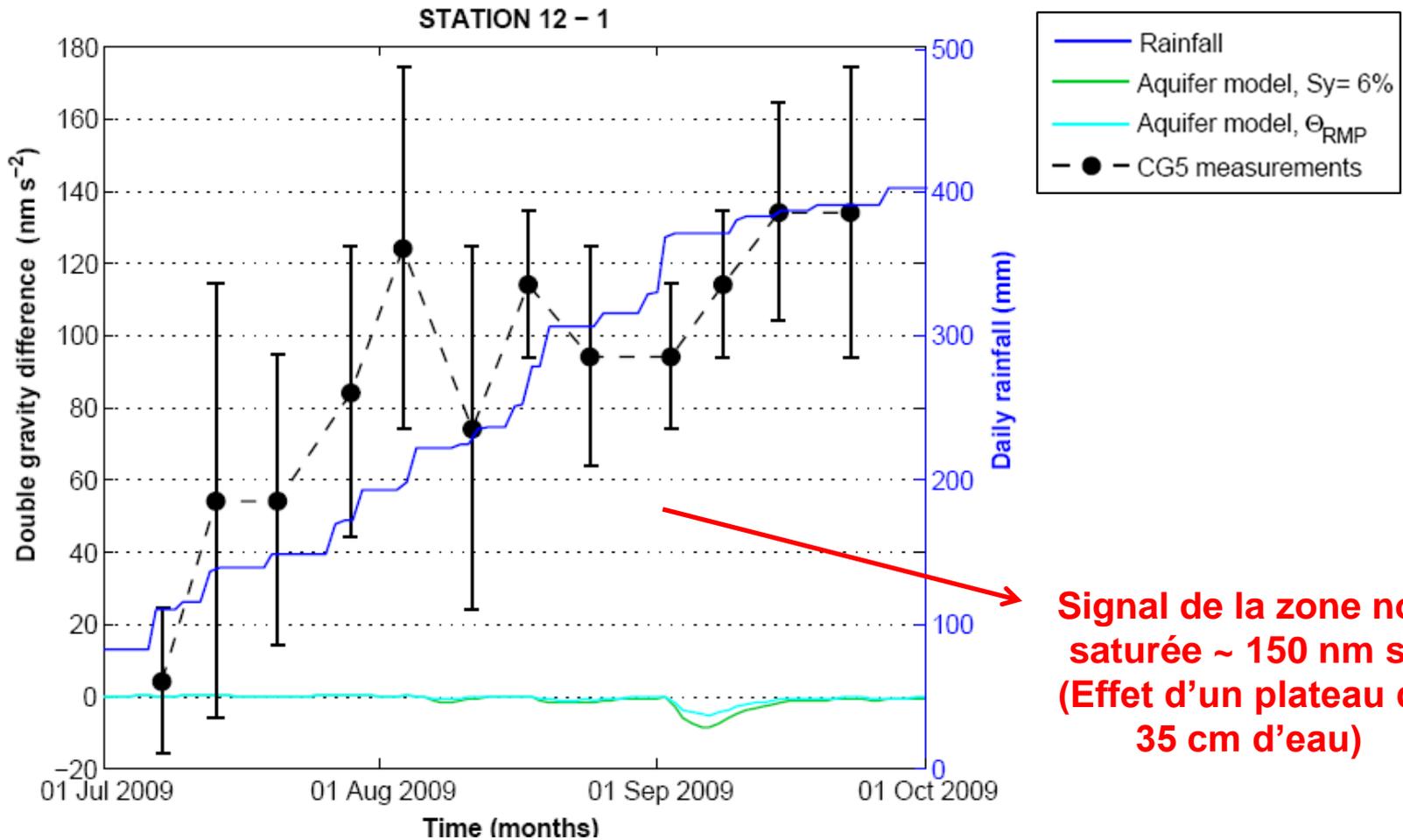
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Signal à l'exutoire d'une ravine



Signal de la zone non saturée  $\sim 150 \text{ nm s}^{-2}$   
(Effet d'un plateau de 35 cm d'eau)

Evolution de la différence de gravité entre la station 12 et la station de référence

Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

Variations spatiales

# Conclusion partielle



- **Densification** des mesures de gravité sur une saison des pluies: près de 1000 points en 3 mois sur 16 stations

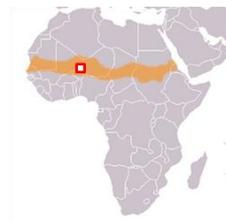
Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Conclusion partielle



- **Densification des mesures de gravité sur une saison des pluies: près de 1000 points en 3 mois sur 16 stations**
- **Un signal existant...**
  - **Un signal maximal de 600 nm s<sup>-2</sup> sur la mare (incertitude moyenne 65 nm s<sup>-2</sup>)**
  - **Un signal de +/- 150 nm s<sup>-2</sup> sur le réseau aval (incertitude moyenne < 50 nm s<sup>-2</sup>)**



**Indiquant une forte variabilité spatio-temporelle des stocks d'eaux aux échelles locale et intra-saisonnière**

Sahel

Hydro-géodésie

Cycles de mousson

Variations spatiales

# Conclusion partielle



- **Densification des mesures de gravité sur une saison des pluies: près de 1000 points en 3 mois sur 16 stations**
- **Un signal existant...**
- **Originaire de :**
  - **La mare** :  $\sim 600 \text{ nm s}^{-2}$  sur la mare, négligeable ailleurs
  - **La nappe** : signal pouvant être significatif, mais ne suffisant pas à expliquer le signal mesuré
  - **La zone non saturée** : source majeure de variabilité spatiale du signal gravimétrique ?



Mise en évidence et **quantification** d'un processus de **stockage préférentiel** à l'aplomb d'une **ravine**: une zone de **recharge** vers la nappe ?

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Conclusion partielle



- **Densification des mesures de gravité sur une saison des pluies: près de 1000 points en 3 mois sur 16 stations**
- **Un signal existant...**
- **Originaire de:**
  - **La mare**
  - **La nappe**
  - **La zone non saturée**
- **Mais à la limite de détection instrumentale**
  - **Mesures réalisées en amont du bassin versant difficilement exploitables (transport des instruments)**
  - **Peu informatif en l'absence de données hydrodynamiques complémentaires**

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Conclusion



- La gravimétrie **intègre** les signaux hydrologiques
  - Aux échelles **locales** et **continentales**
  - Sur toute la colonne de sol: eaux de **surface**, humidité du **sol** et **aquifère**
- Apport de la méthode
  - **Contraintes** sur les paramètres hydrologiques
  - **Image dynamique** des stocks d'eau
- Limites de la méthode
  - Signaux hydrologiques à la **limite de détection** instrumentale
  - **Pas de séparation des sources** du signal sur l'axe vertical

Sahel

Hydro-  
géodésie

Cycles de  
mousson

Variations  
spatiales

# Perspectives



## Etude des processus hydrologiques

- Distribution de l'eau dans la zone non saturée: continuité du suivi par **sonde à neutrons**
- Contenu en eau de la nappe: relation exacte entre la **porosité de drainage** et la teneur en eau **RMP?**

# Perspectives



**Etude des processus hydrologiques**



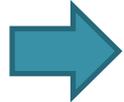
**Un outil intéressant pour la modélisation**

- Une donnée **intégrative**
- Un **volume d'échantillonnage** significatif
- Un jeu de données **distribué temporellement et spatialement**

# Perspectives



**Etude des processus hydrologiques**



**Un outil intéressant pour la modélisation**



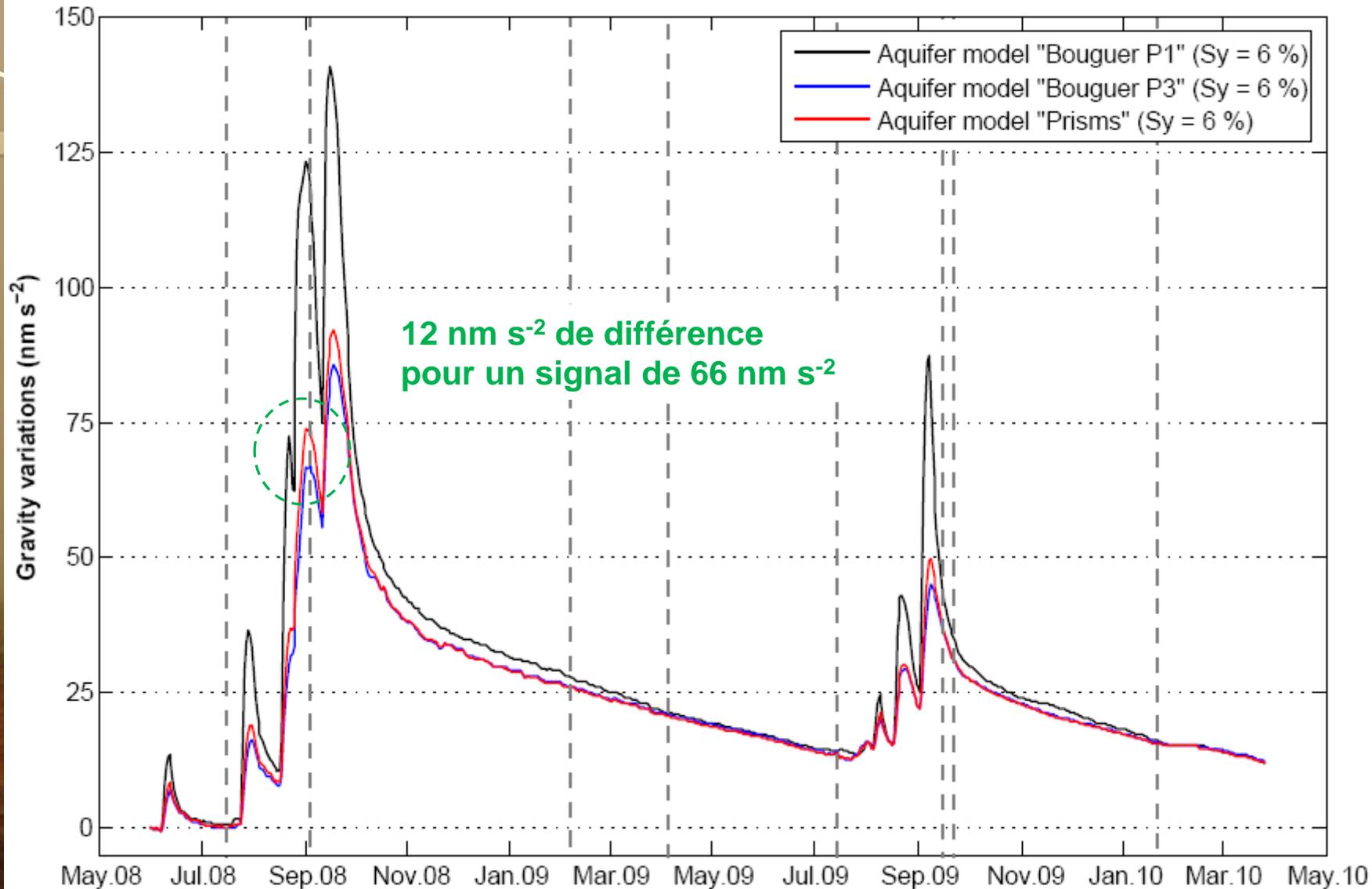
**Echelle régionale**

- Utilisation d'**observations satellites** pour la caractérisation de la variabilité des ressources en eau ?
- Lien entre la mesure **in situ** et la mesure **satellite**?

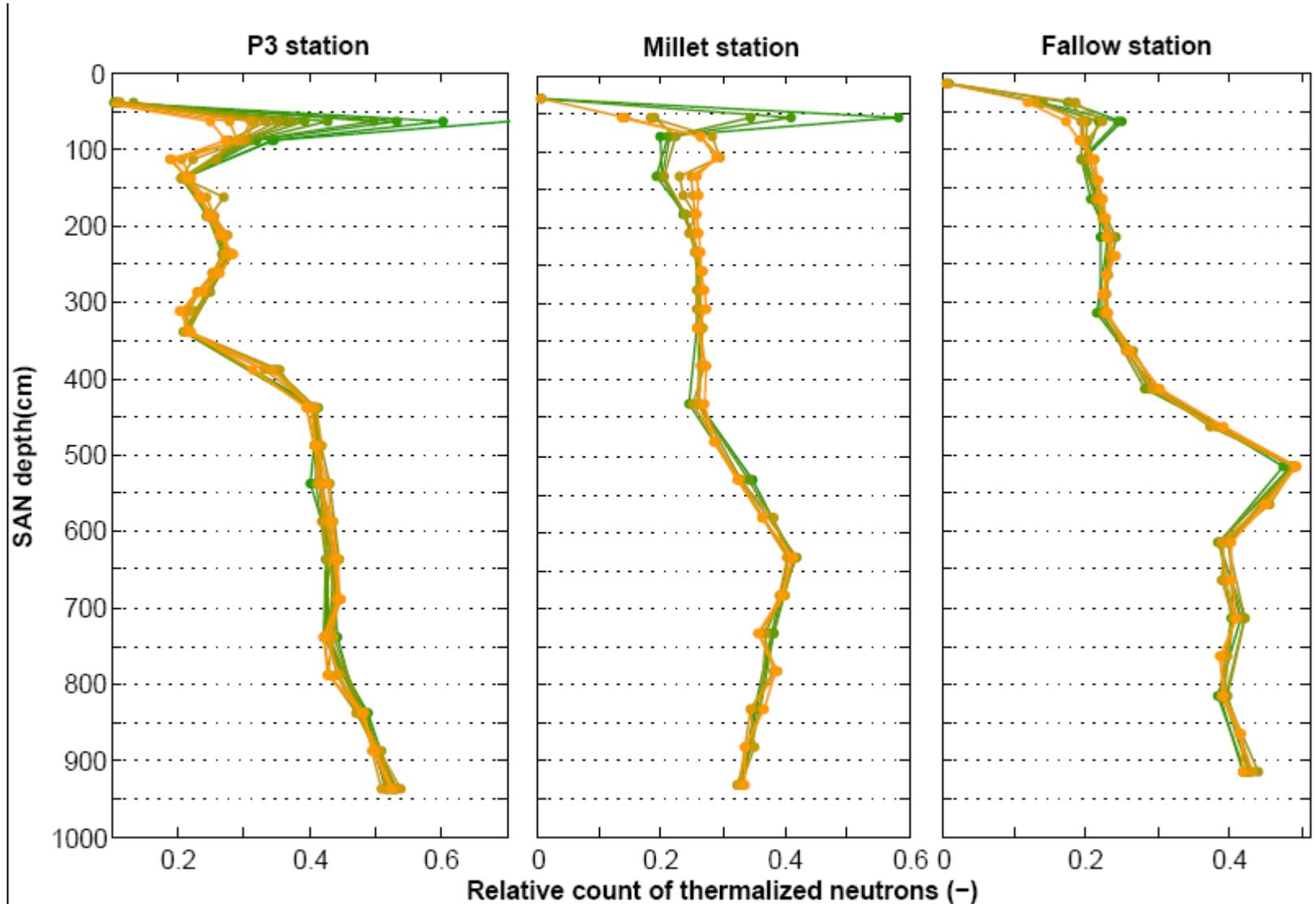
# Remerciements

Jaques Hinderer Guillaume Favreau  
Cédric Champollion Marie Boucher  
Bernard Cappelaere Monique Oï  
Jean-Paul Boy Caroline de Linage  
Maxime Mouyen Olivier Robert aux  
nombreux étudiants de l'université  
Abdou Moumouni ayant participé au  
projet Thibaud Gendre Bodo Bernard  
Luck Nicolas Le Moigne Nathalie  
Benarrosh Marta Calvo Sébastien  
Deroussi Nazoumou Yahaya  
Maimouna Ibrahim Pierre Genthon  
Jerôme Demarty Basile Hector Roger  
Bayer aux VI à tout le personnel de  
l'IRD et à toutes les personnes que  
j'aurais oubliées.

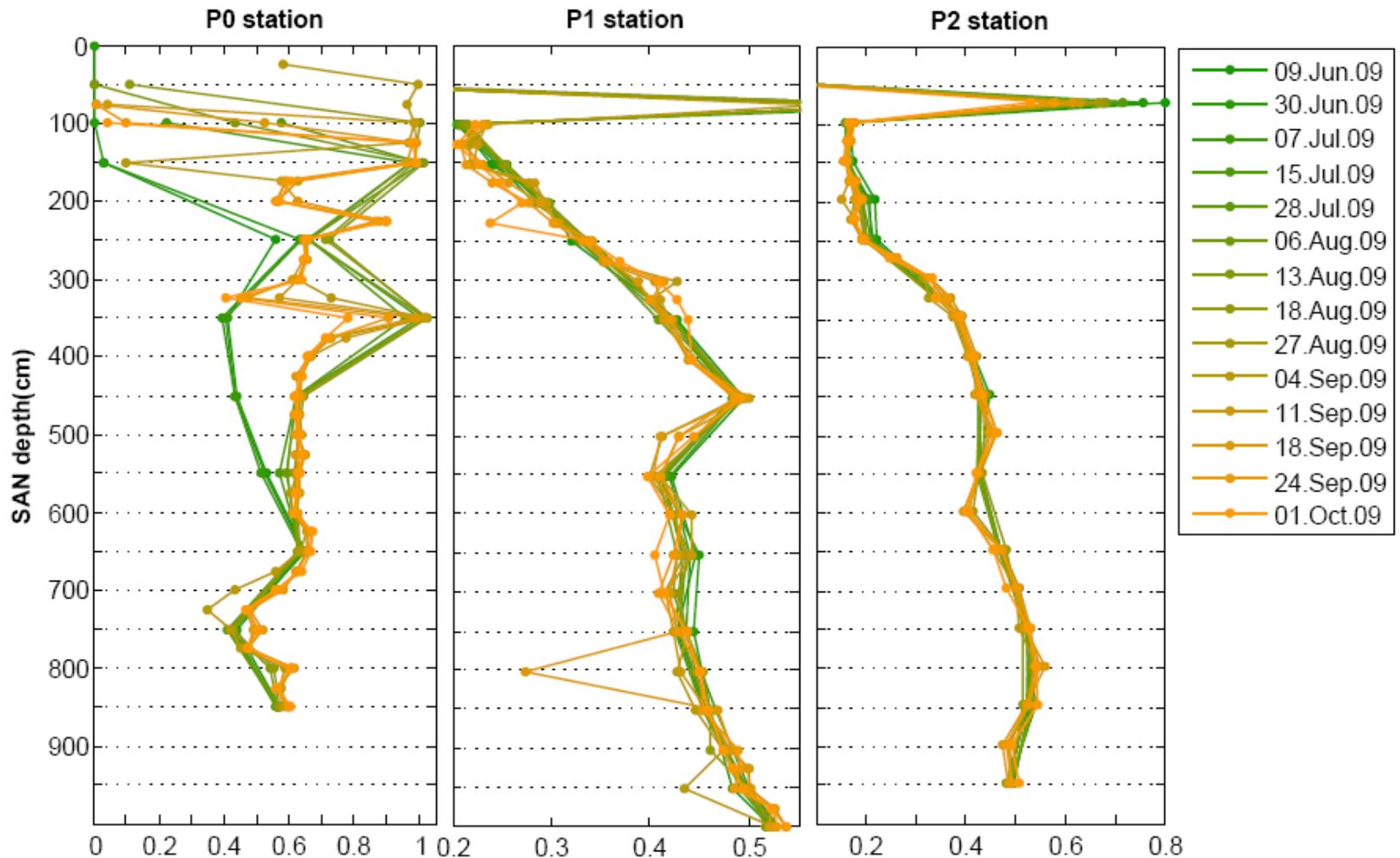
# Annexes: comparaisons des modèles d'aquifères



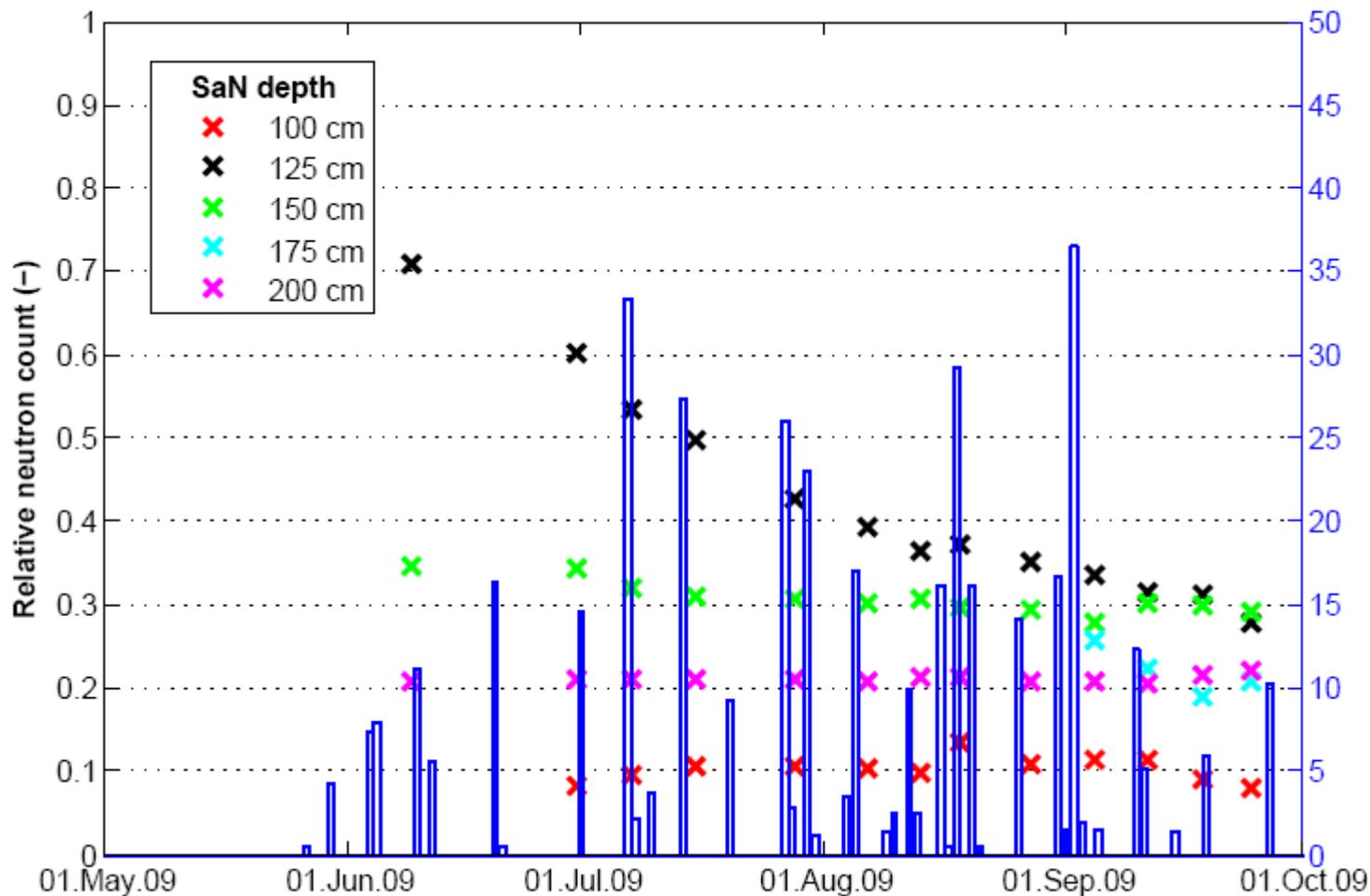
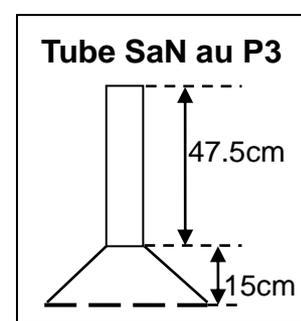
# Annexes: comptages relatifs de neutrons



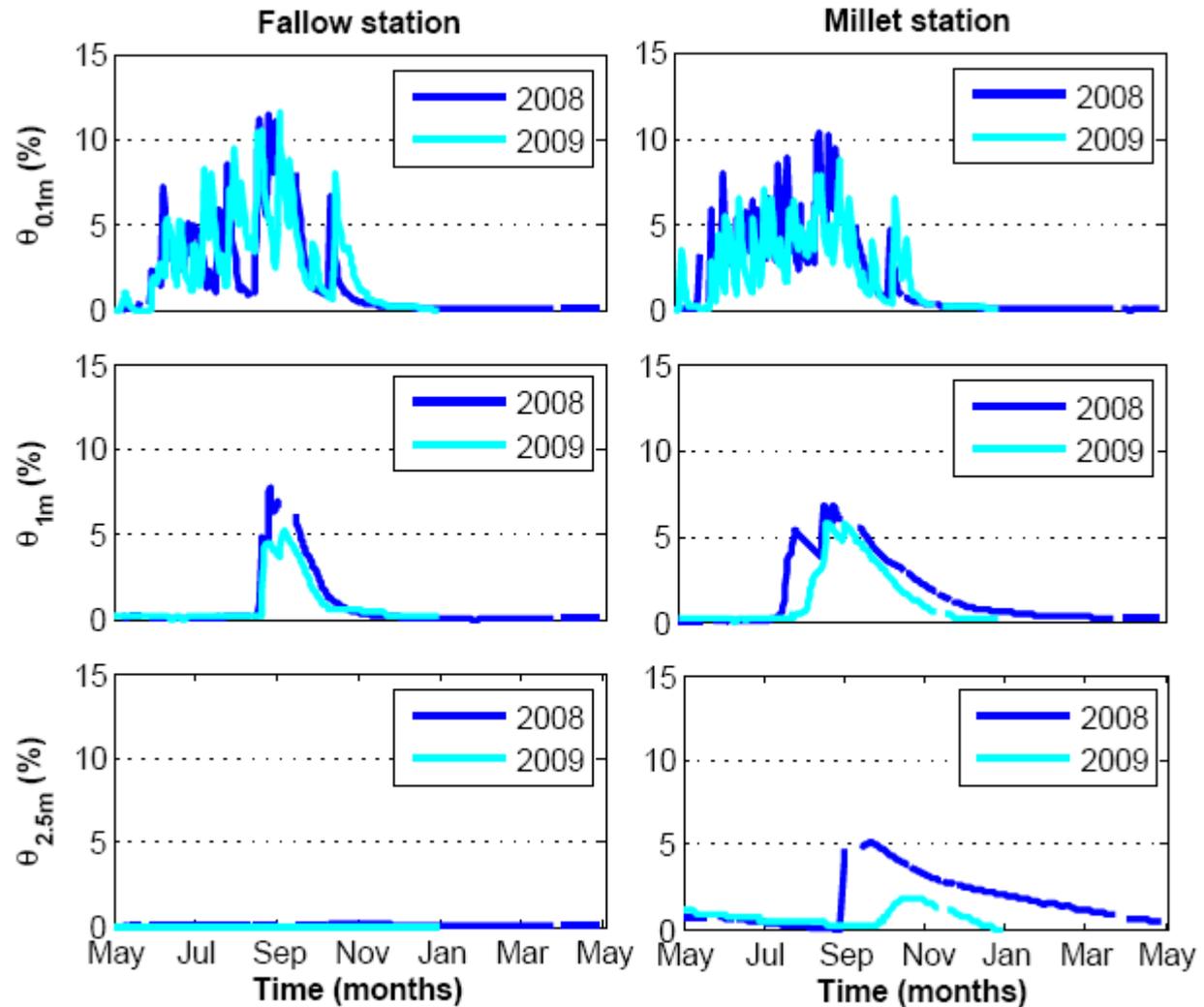
# Annexes: comptages relatifs de neutrons



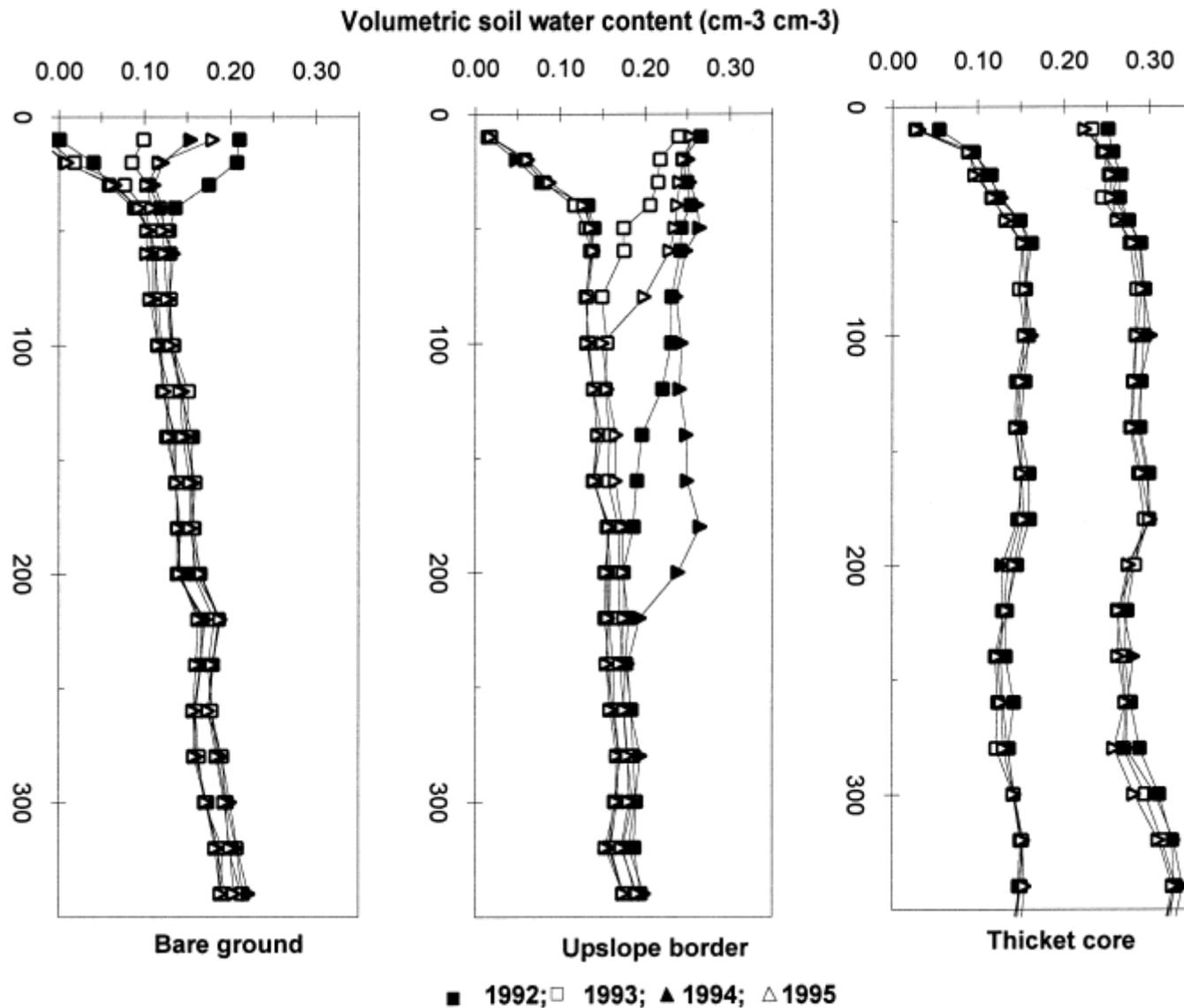
# Annexes: comptages relatifs de neutrons



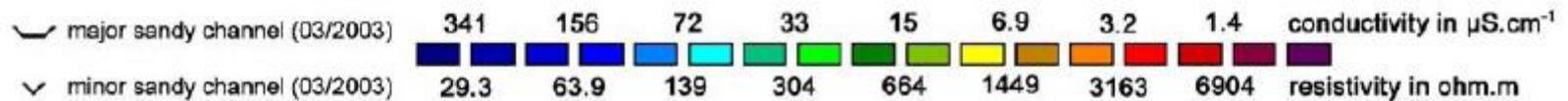
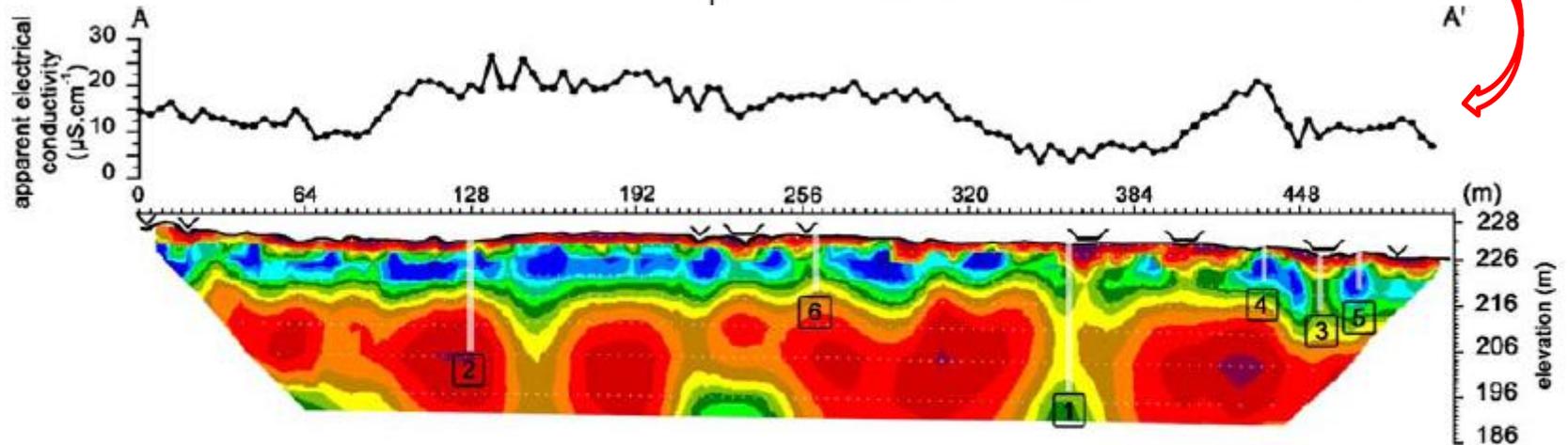
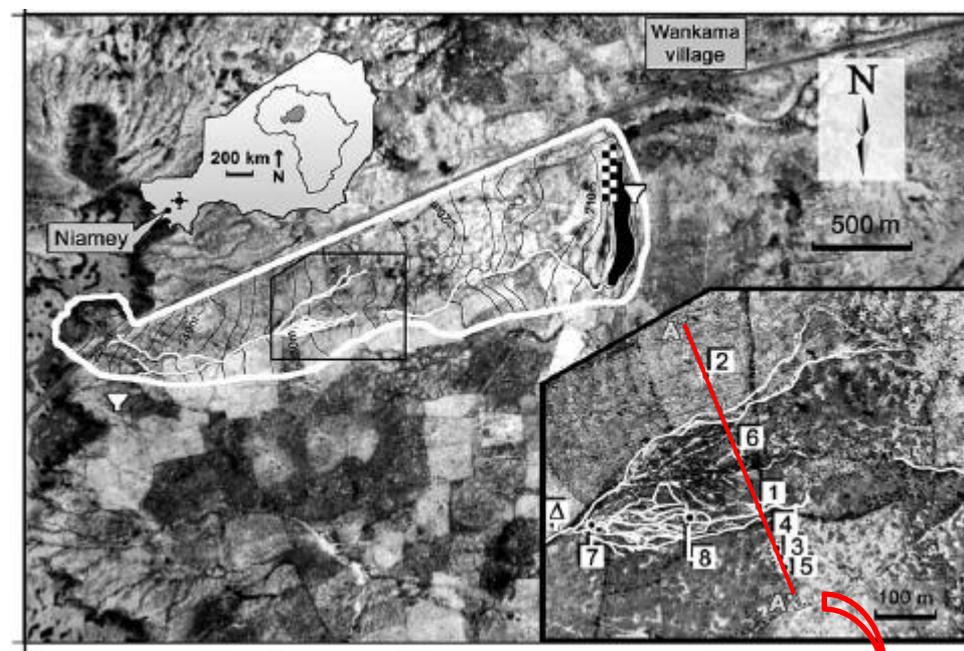
# Annexes: humidité volumique (sondes capacitives)



# Annexes (Galle et al., 1998): humidité volumique sous brousse tigrée



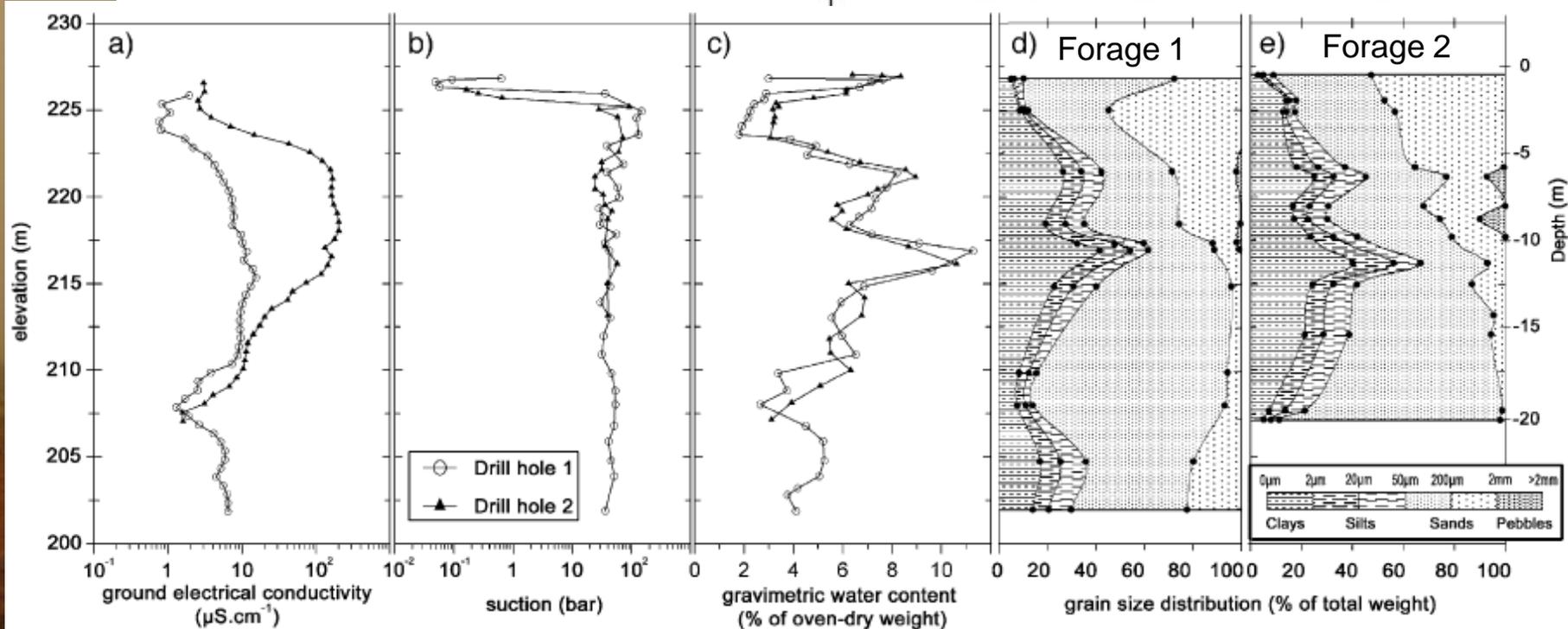
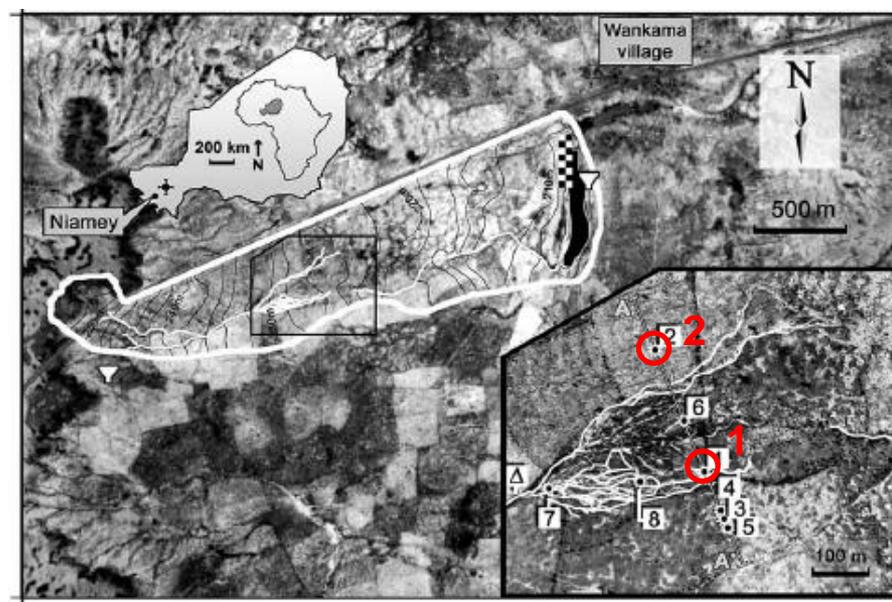
# Annexes: zone non saturée (Massuel et al., 2006)



Tomographie de résistivité électrique réalisée sur le bassin versant de Wankama

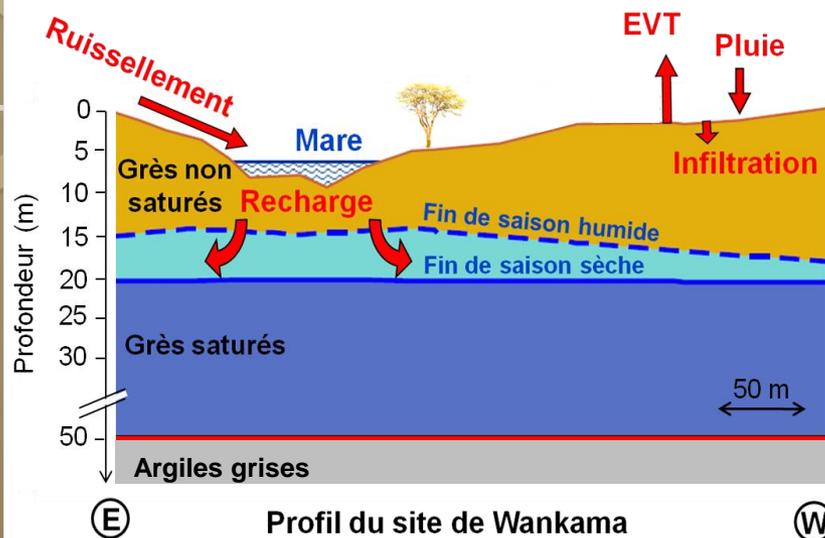
# Annexes: zone non saturée

(Massuel et al., 2006)

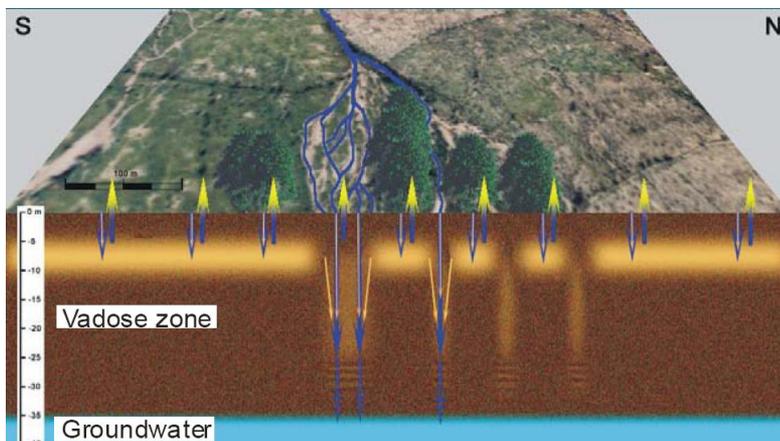


Paramètres physiques mesurés aux forages 1 et 2

# Annexes: une recharge de la nappe localisée



- Points de recharge avérés:
  - Mares temporaires
  - Cônes alluviaux (épisodique)
- Points de recharge potentiels:
  - Zones humides
  - Brousse tigrée (faible)



Bloc diagramme typique des paysages sahétiens du Sud-ouest Nigérien  
(Massuel, 2005)

# Annexe: dépression du Kori de Dantiandou (Favreau et al., 2002)

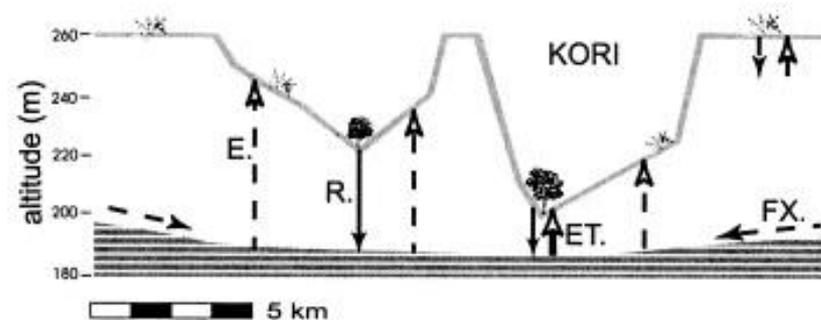
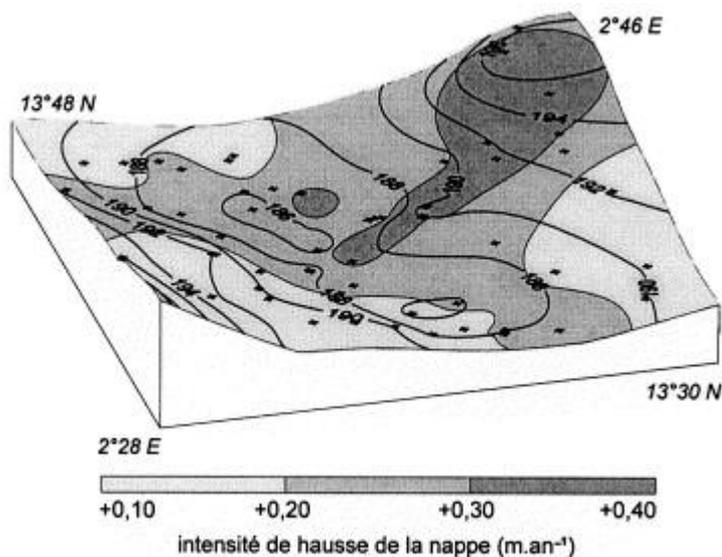


Schéma conceptuel du fonctionnement à l'équilibre de la dépression piézométrique du kori de Dantiandou.

E. ~ 1 – 5 mm.an<sup>-1</sup>

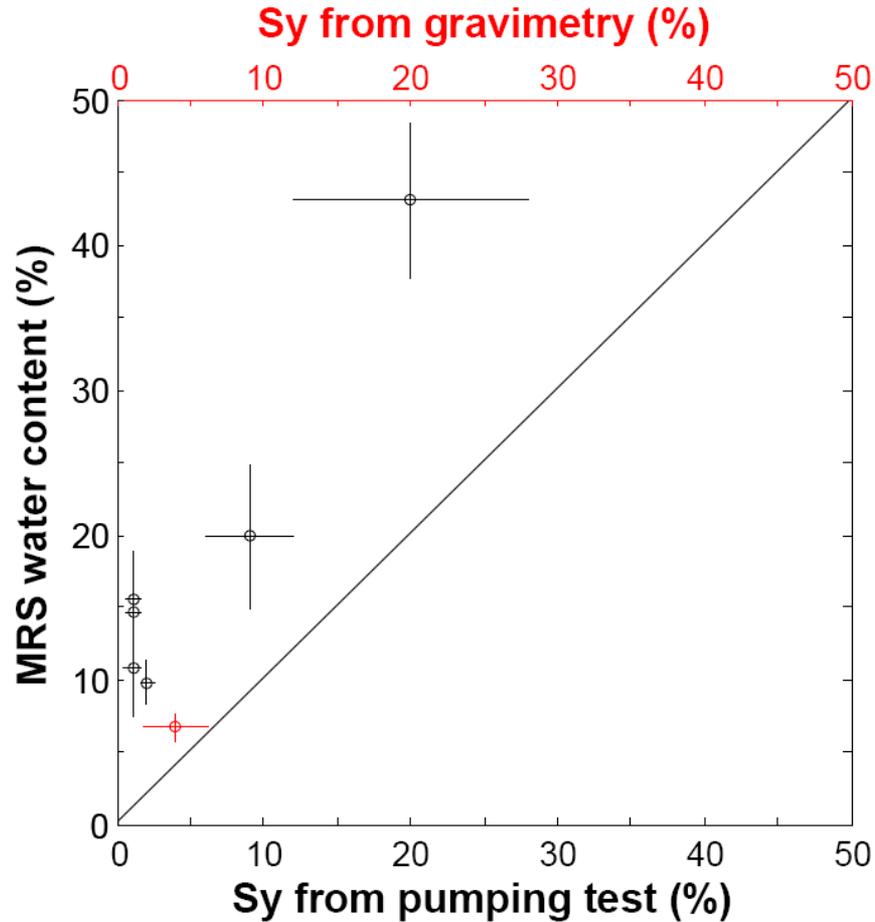
ET. > 5 mm.an<sup>-1</sup> ?

R. (1950) ~ 1 – 5 mm an<sup>-1</sup>

R. (2000) ~ 20 – 50 mm an<sup>-1</sup>

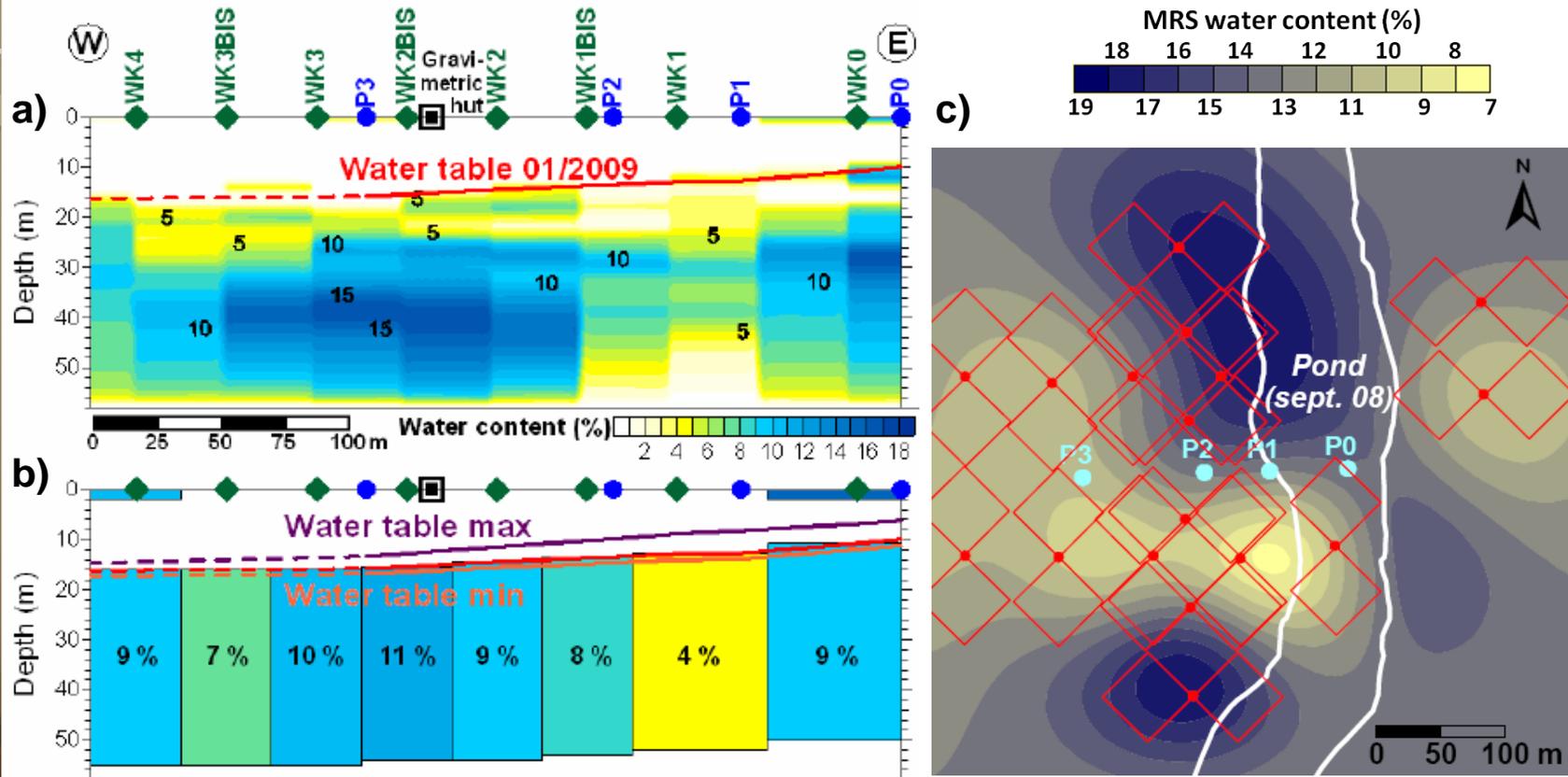
Bloc-diagramme de la partie centrale de la dépression et carte superposée des intensités de la hausse piézométrique interannuelle (1991–1998, en m. an<sup>-1</sup> )

# Annexes: comparaison des porosités de l'aquifère du CT



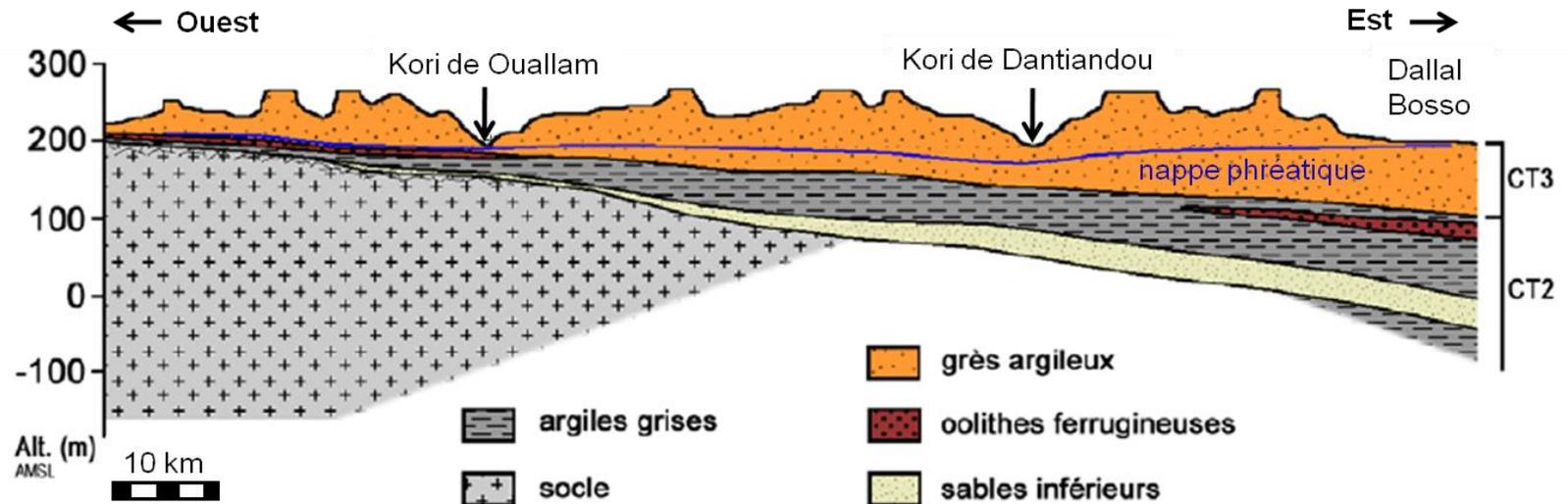
Comparaisons des porosités de drainage aux teneurs en eau RMP

# Annexes: comparaison des modèles de contenu en eau RMP



Modèles de teneurs en eau de l'aquifère obtenus à partir des sondages RMP:  
 a) inversion automatique multicouches du logiciel Samovar b) inversion 1D avec géométrie imposée c) inversion 1D avec géométrie imposée.

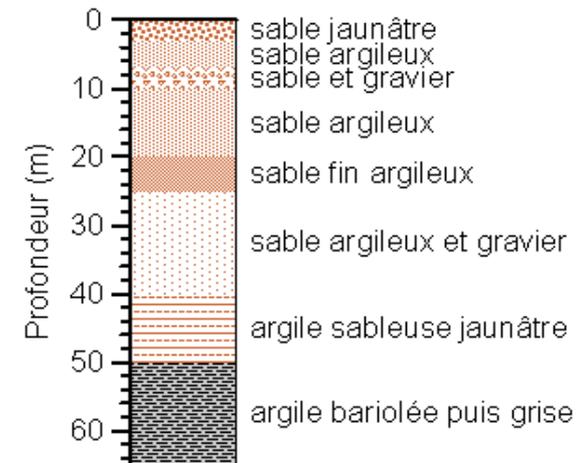
# Annexes: géologie du site d'étude



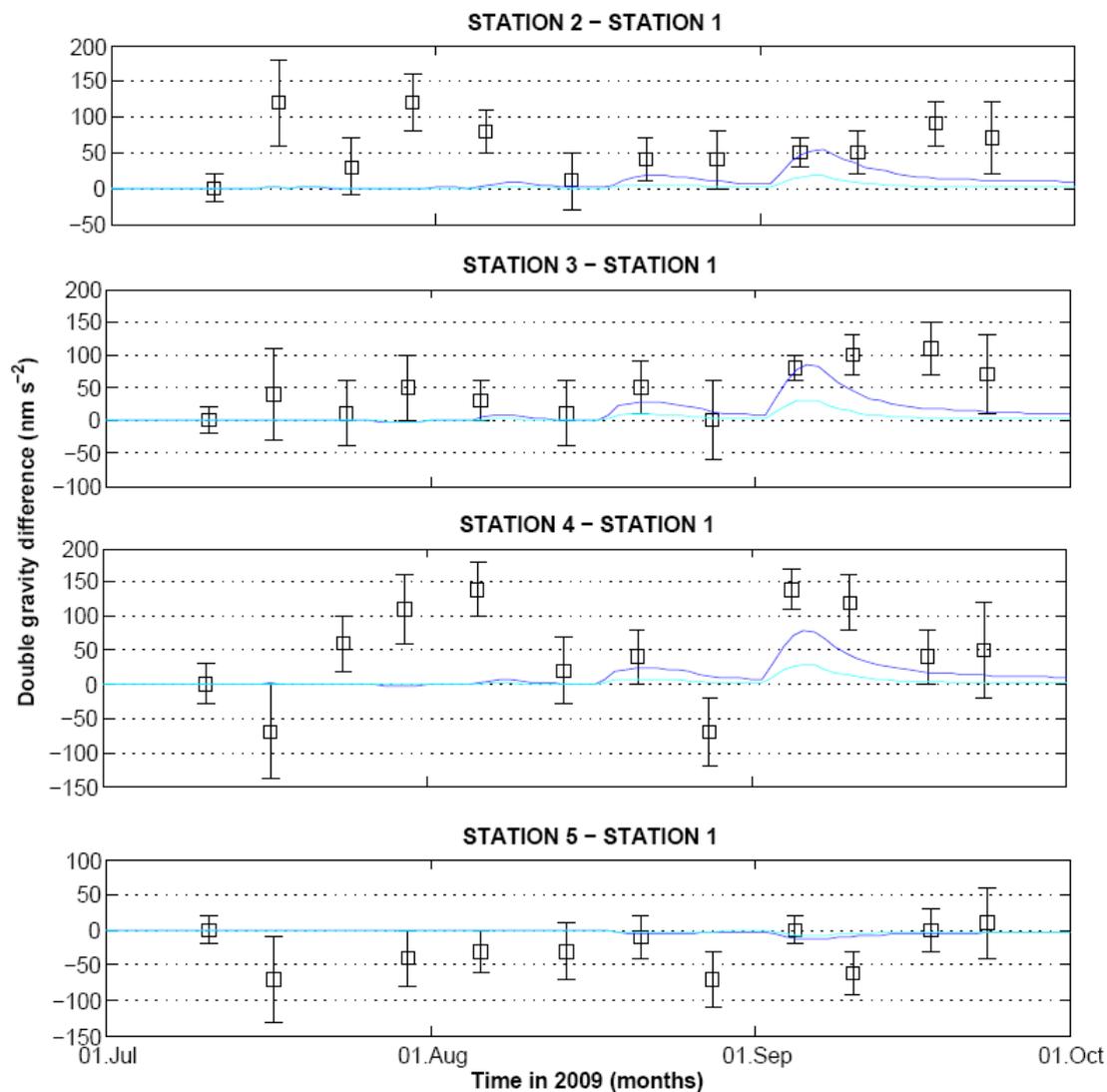
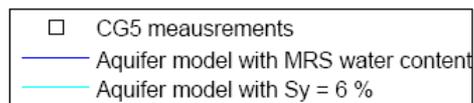
## Coupe géologique à 13°40" N dans le degré carré de Niamey

(d'après Montfort, inédit, modifié dans Massuel, 2005)

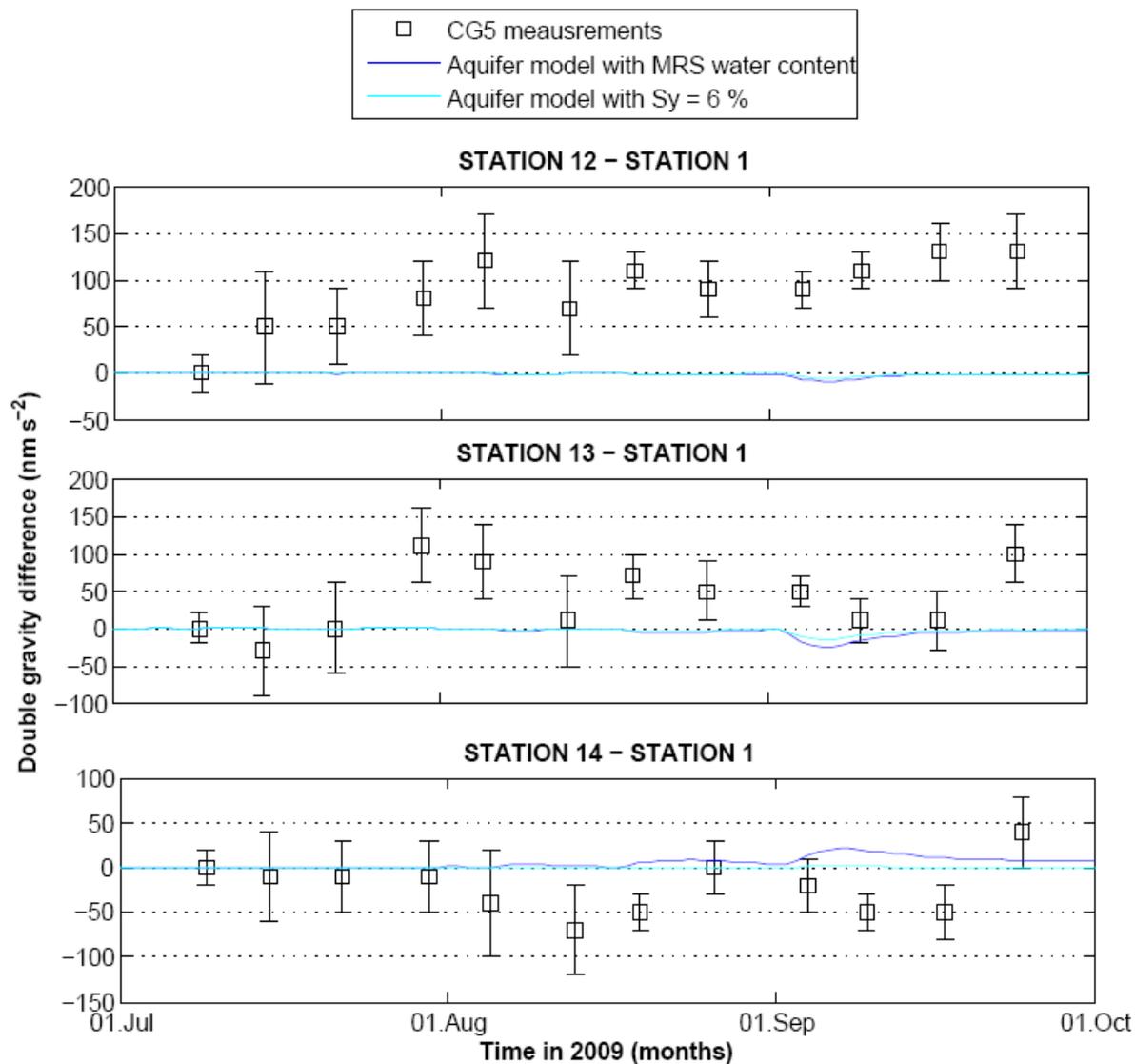
### Description du log géologique de Wankama (Ministère de l'Hydraulique du Niger, pers. com.)



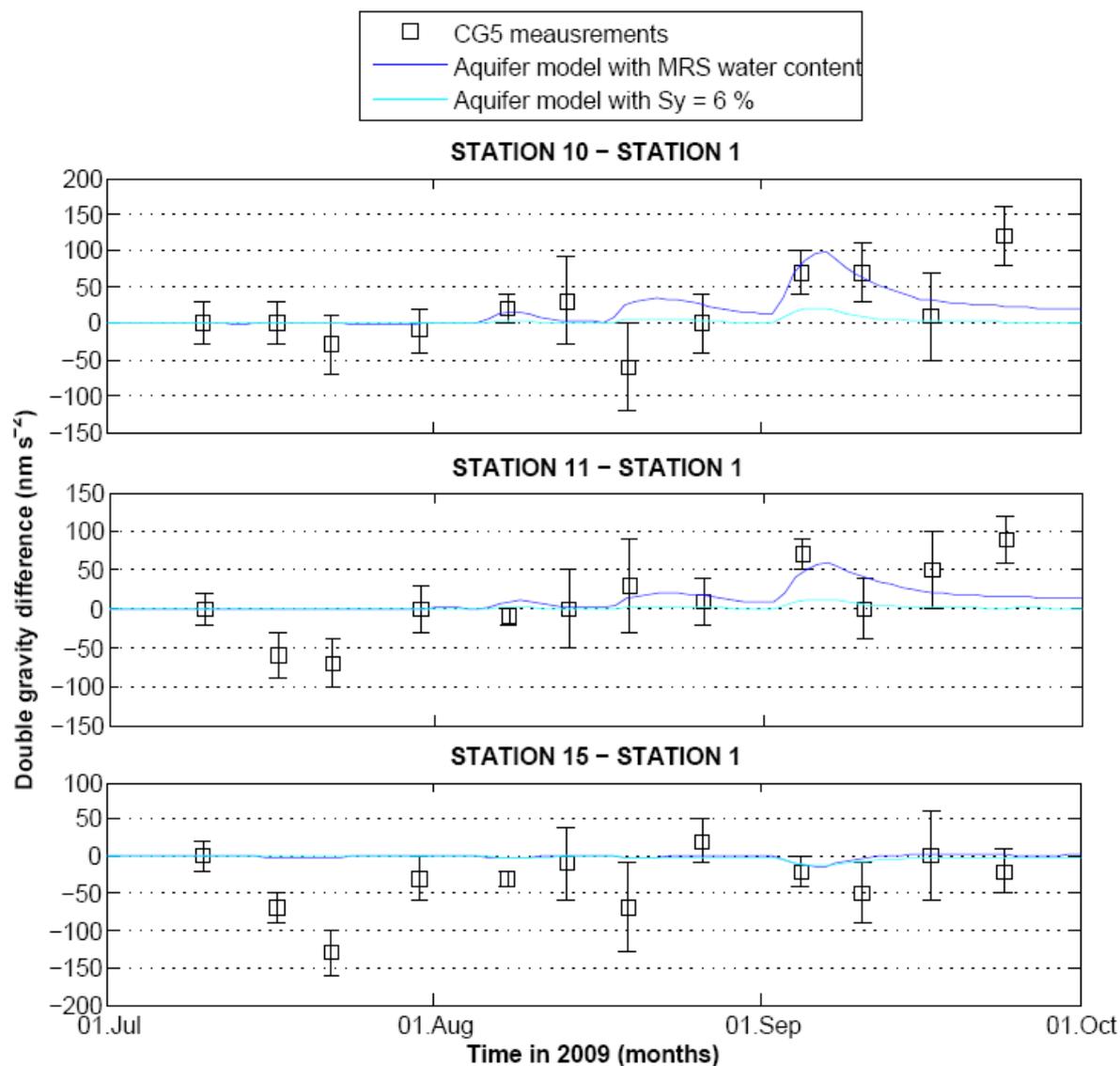
# Annexes: microgravimétrie



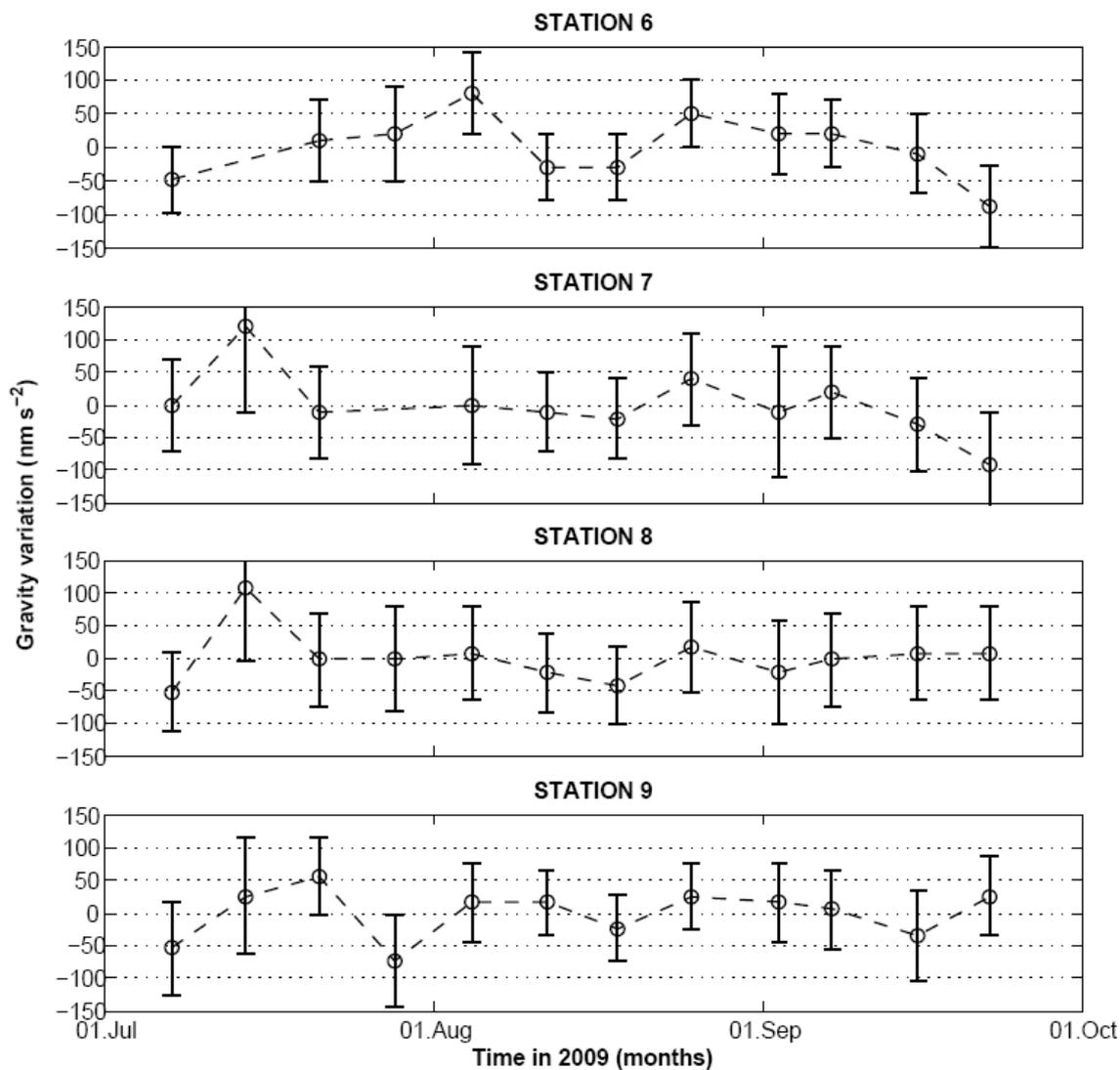
# Annexes: microgravimétrie



# Annexes: microgravimétrie

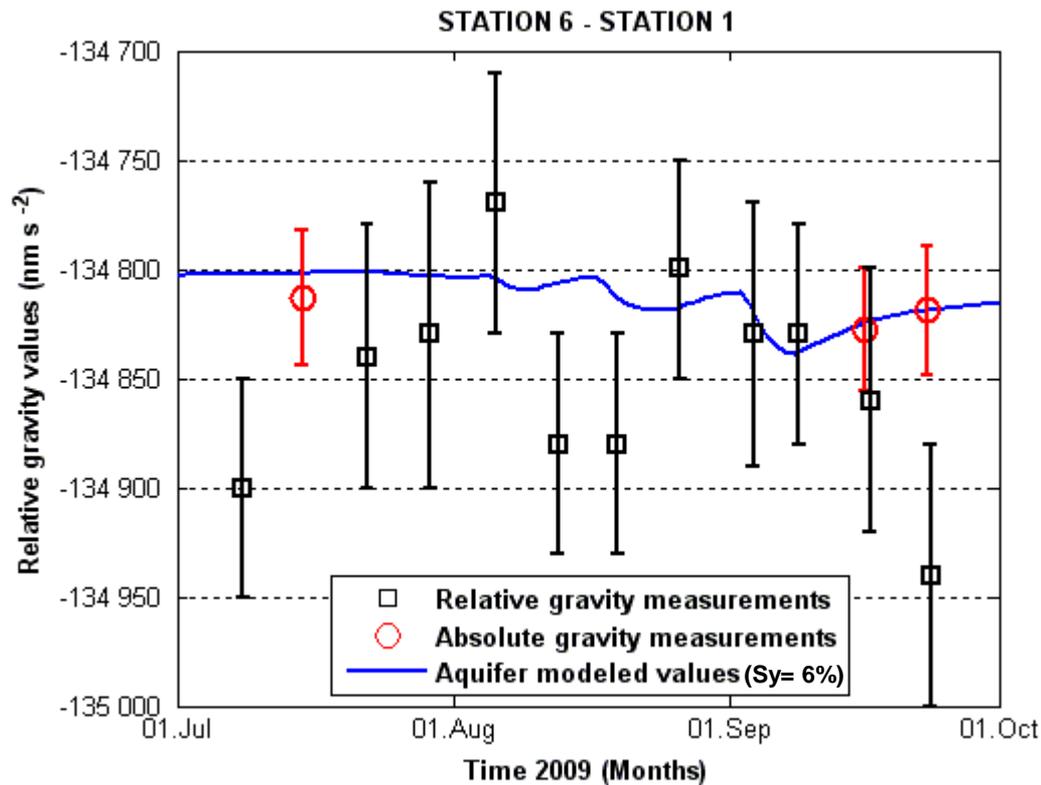


# Annexes: microgravimétrie



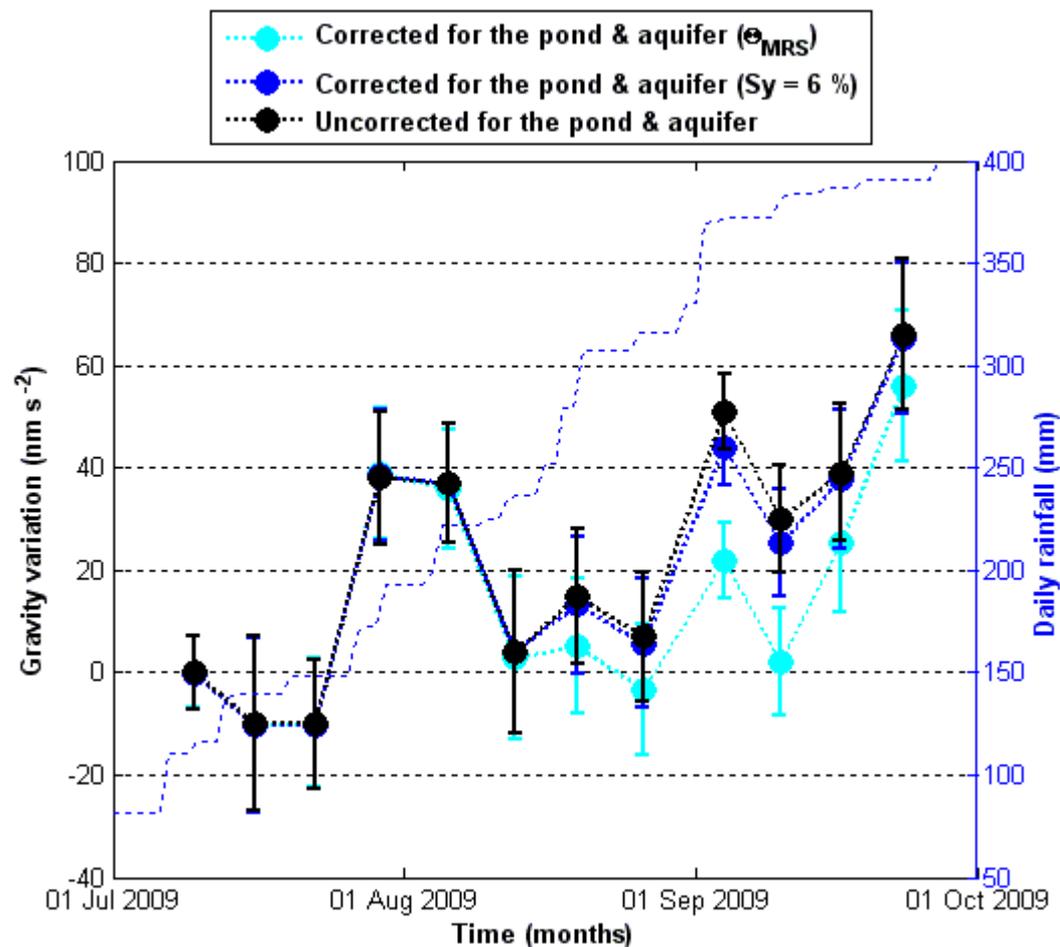
**Variations de la gravité mesurées pour la boucle plateau**

# Annexes: microgravimétrie



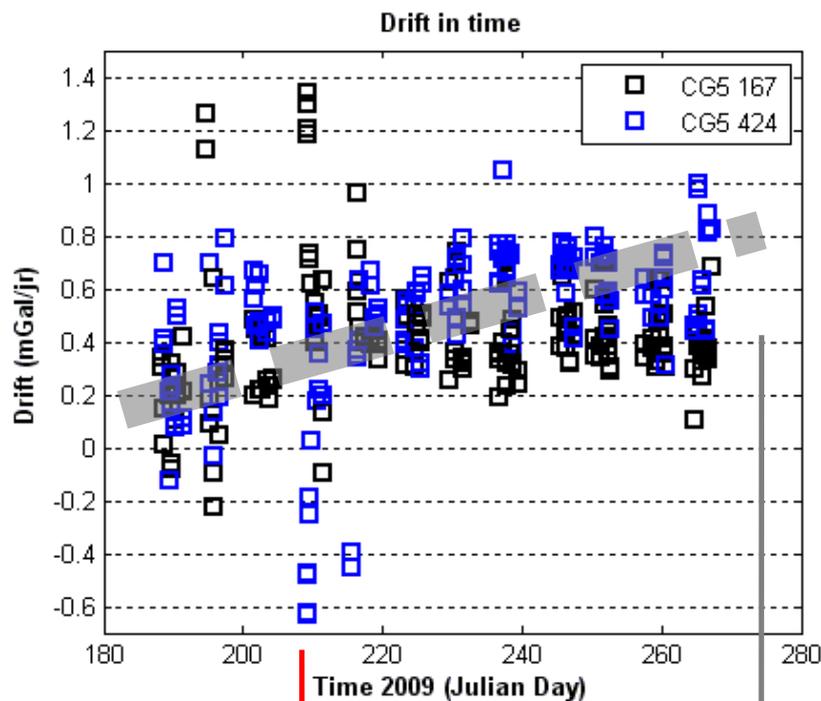
**Comparaisons des valeurs relatives de la gravité entre la station plateau et la station de référence**

# Annexes: microgravimétrie



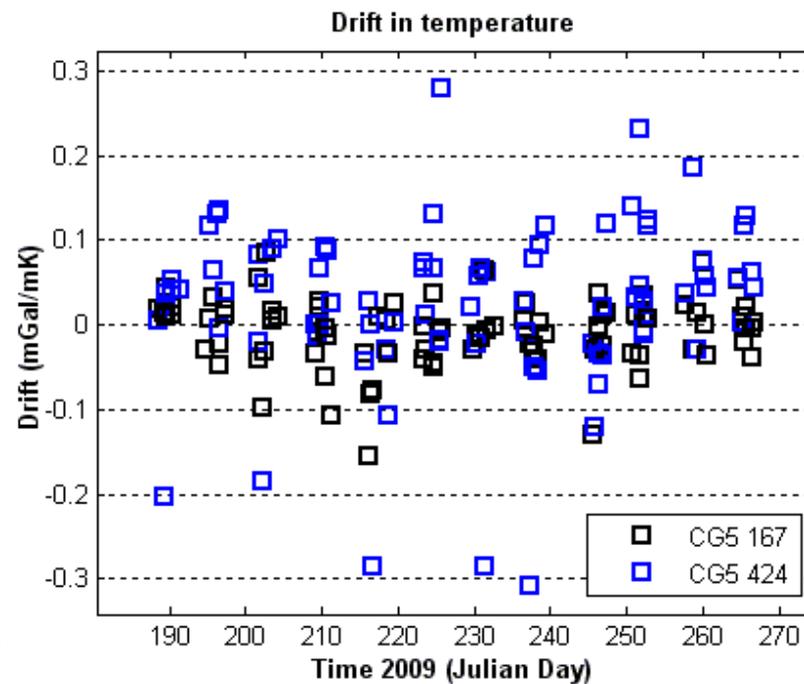
Moyenne des doubles différences corrigées ou non des effets de la nappe, selon deux modèles de porosité différents.

# Annexes: microgravimétrie



**Pertes de charge**

Augmentation de  
la dérive en temps



**Dérive en température 424**

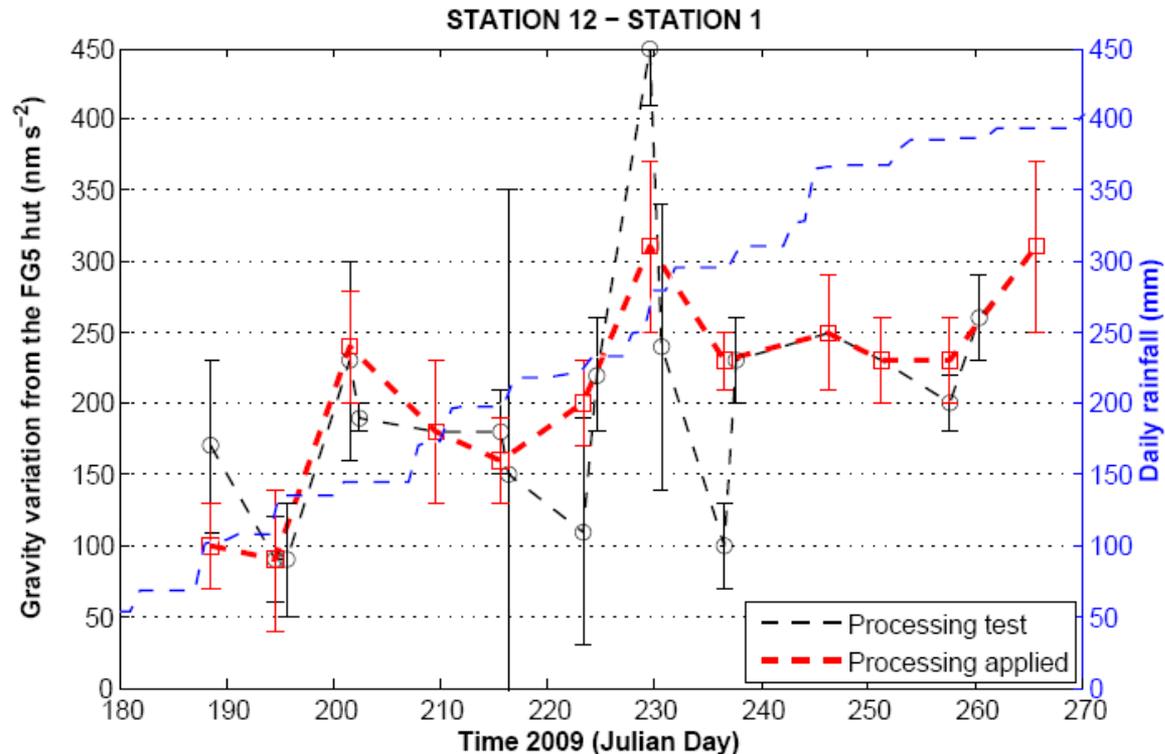
>

**Dérive en température 167**

# Annexes: microgravimétrie

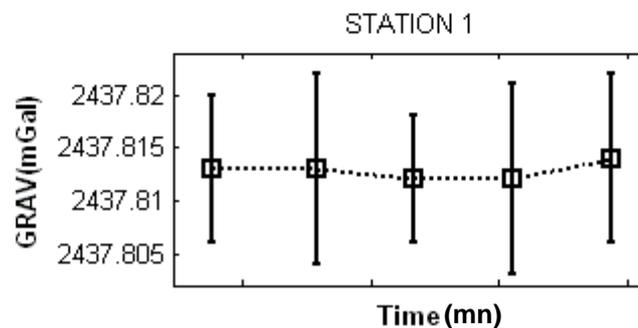
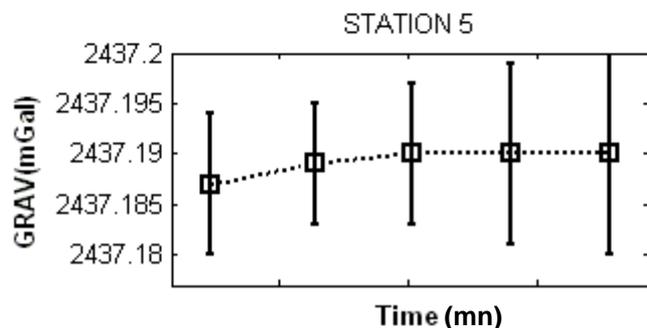
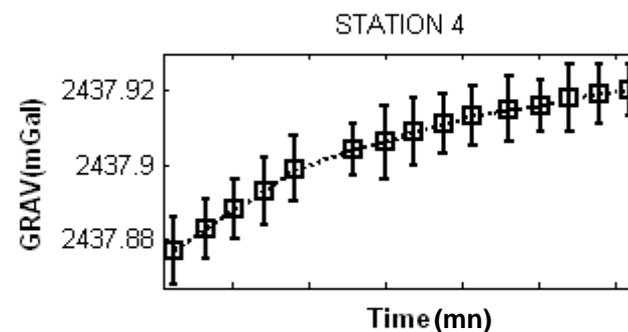
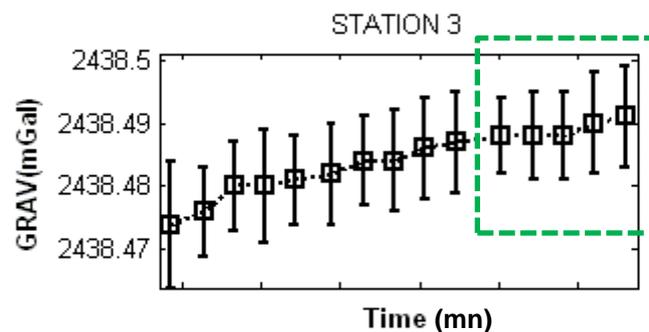
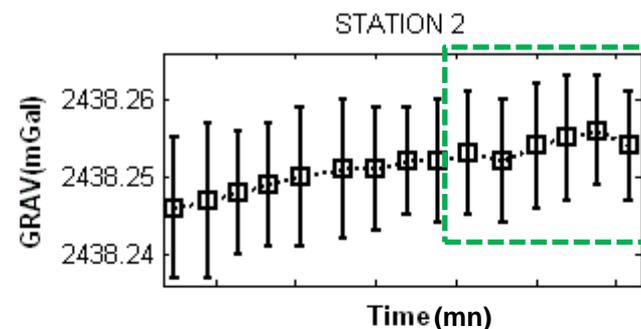
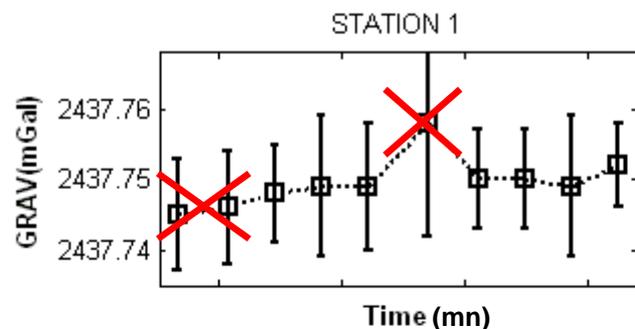


- Séparation des mesures en cas de pluies:

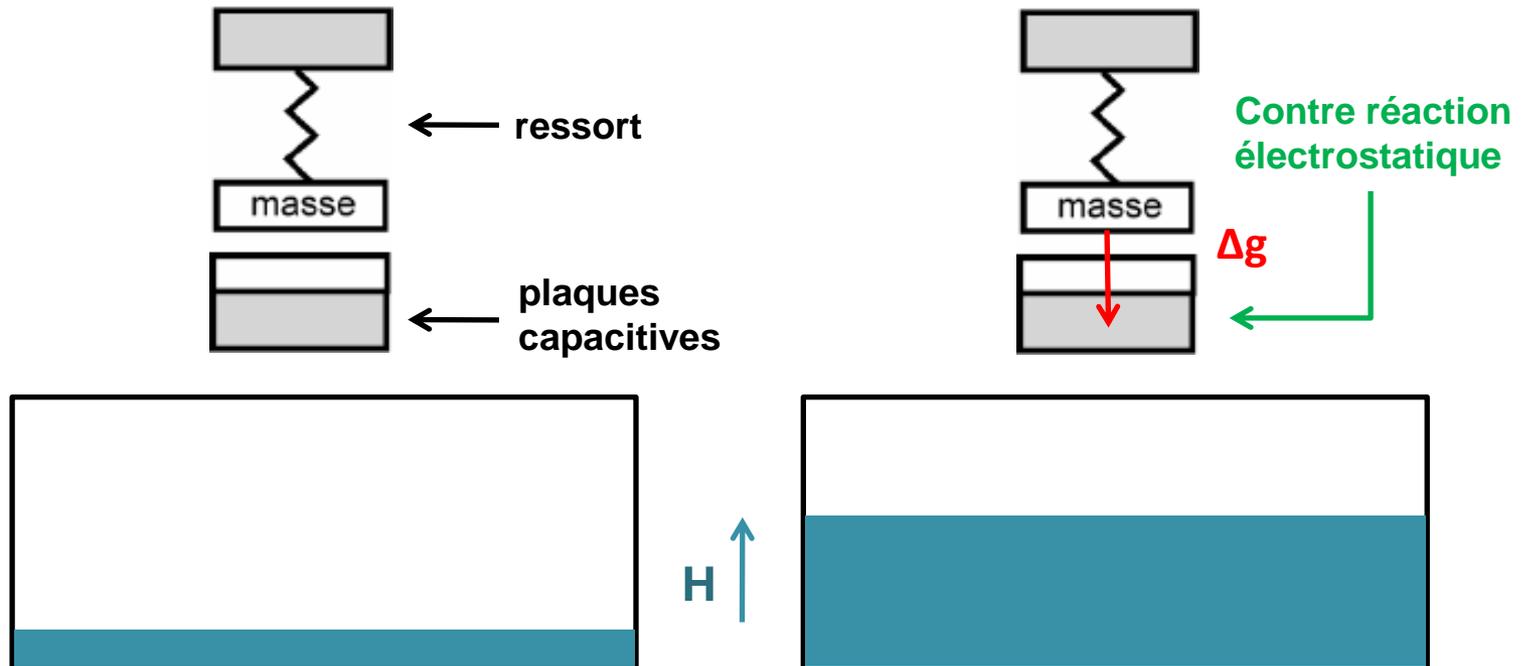


- **Instabilité de l'inversion:** augmentation du nombre d'inconnues, diminution du nombre d'observations
- **Compromis:** résolution temporelle / bruit

# Annexes: microgravimétrie

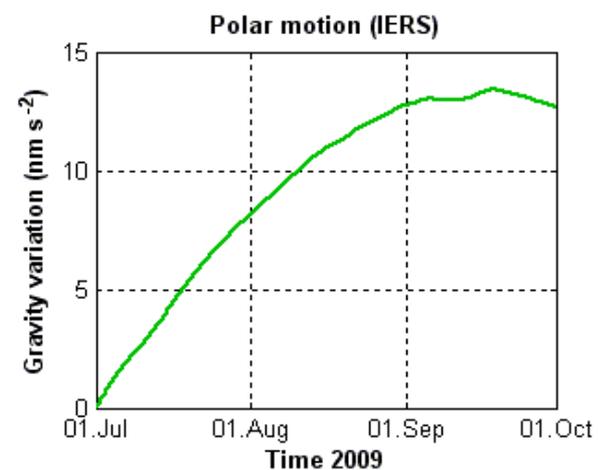
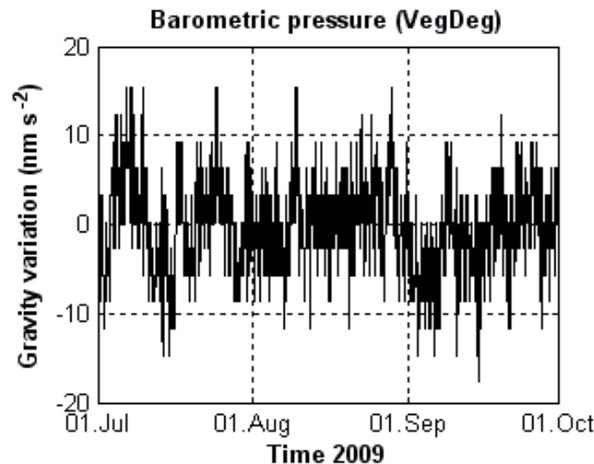
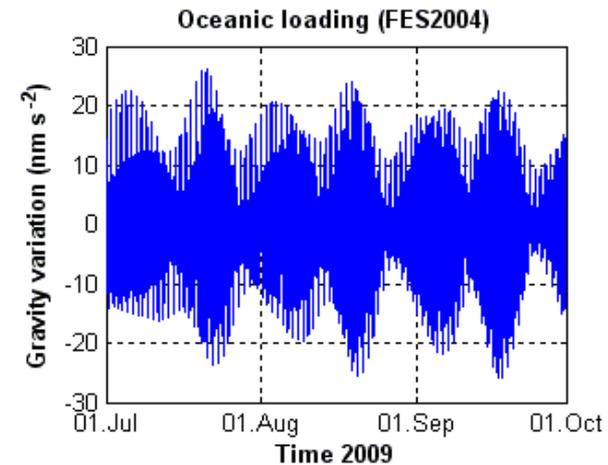
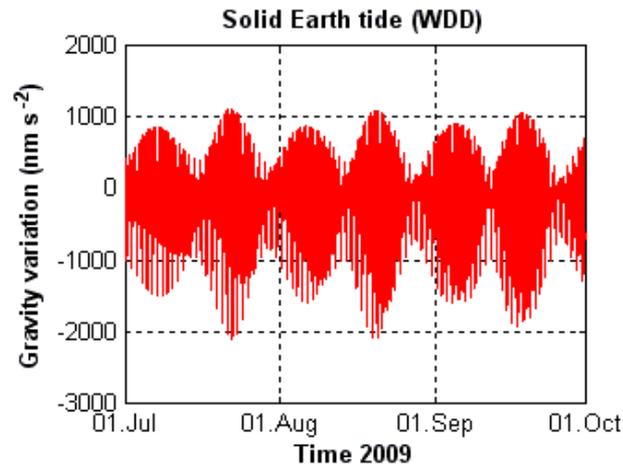


# Annexes: microgravimétrie



- Etirement du ressort : dérive instrumentale
- Sensibilité à la température > enceinte thermostatée
- Bruit sismique (transport de l'appareil)

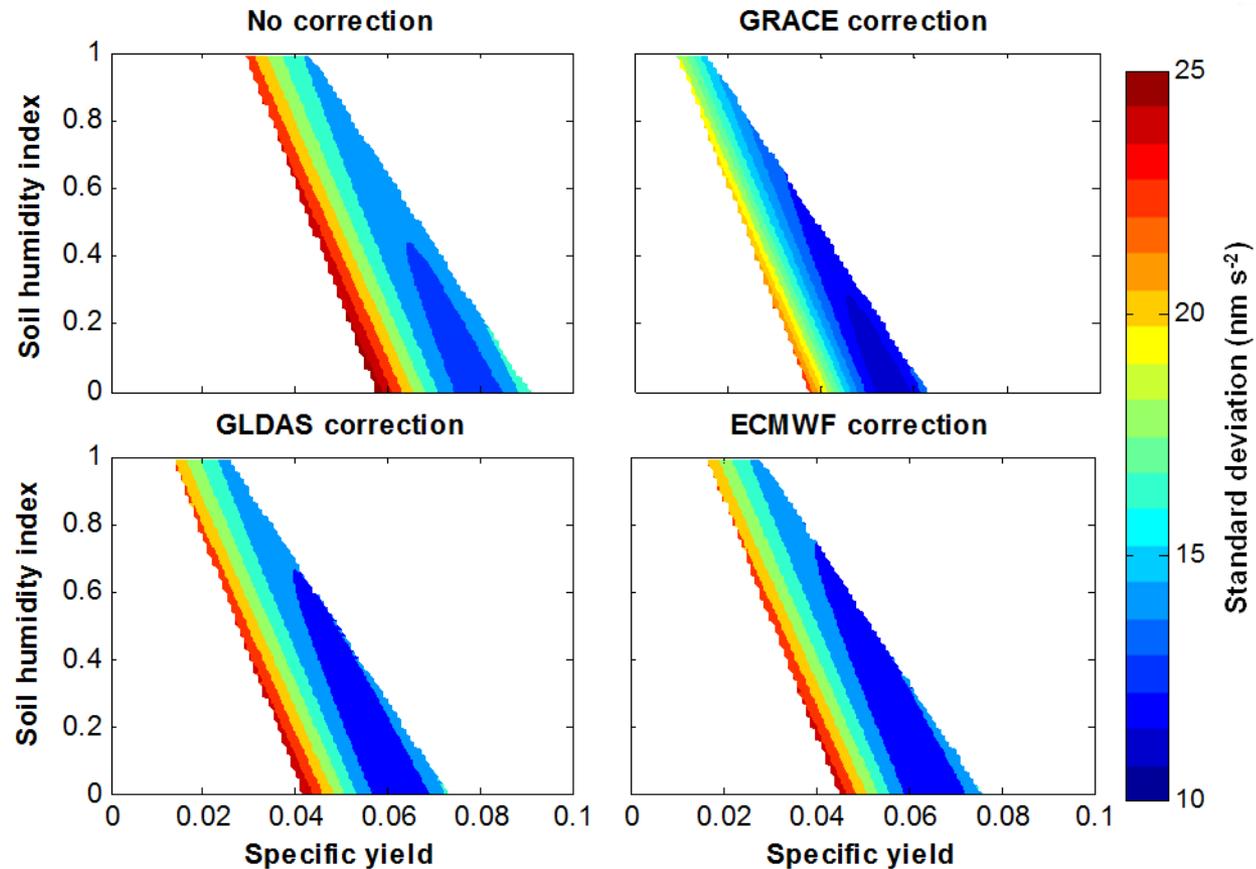
# Annexes: corrections appliquées aux mesures gravimétriques



**Variations de la gravité induites par la marée solide, la surcharge océanique, la pression atmosphérique et le mouvement du pôle: Wankama, été 2009**

# Annexes: FG5 vs modèle hydro. local

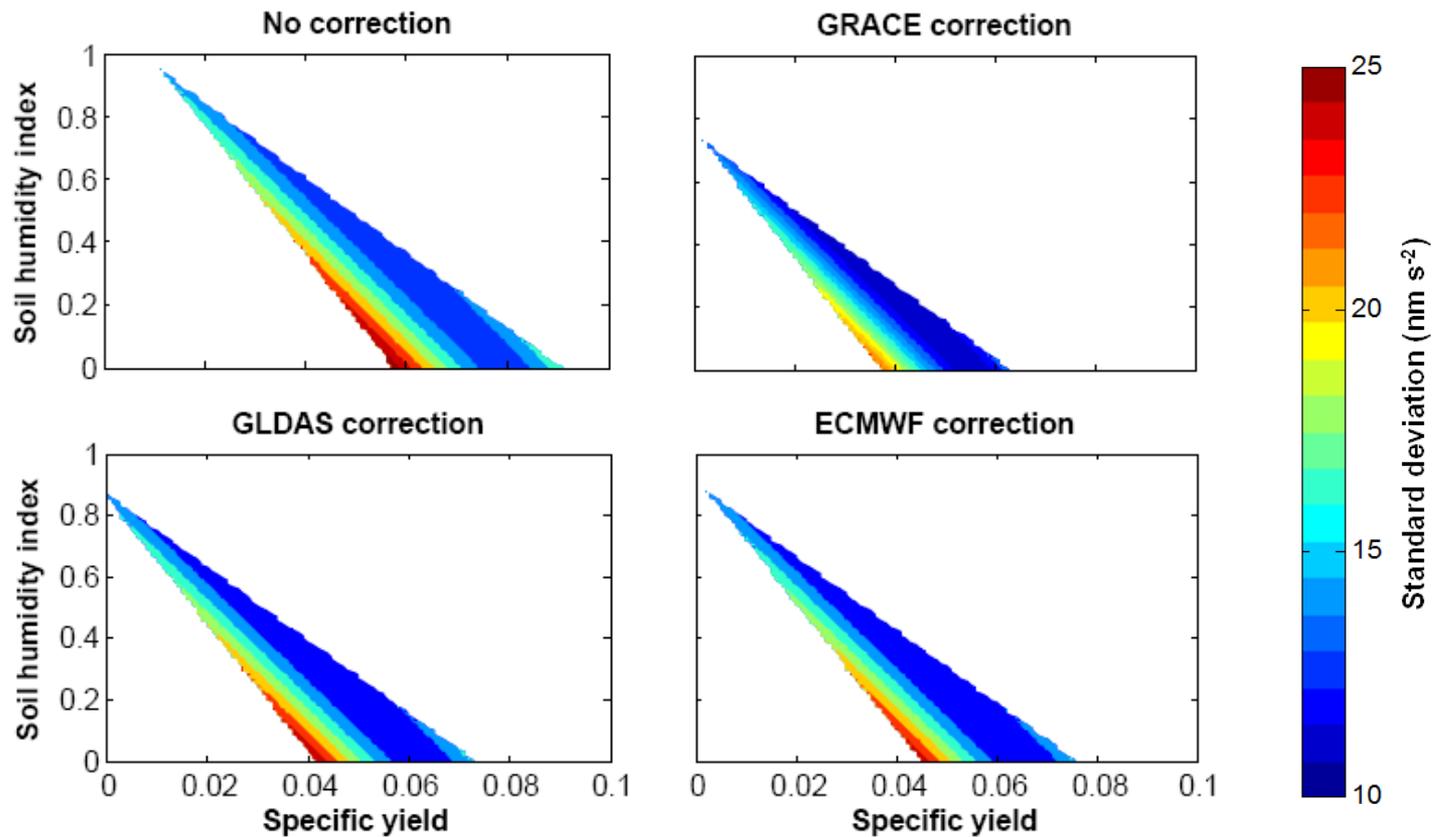
(soil water content at the FG5 site  $\leq$  soil water content at the fallow site)



Plages de paramètres pour lesquelles le modèle gravimétrique est inclus dans les barres d'erreurs des mesures FG5. L'échelle de couleur indique l'écart type de la différence entre modèle et mesure pour chaque couple de paramètres.

# Annexes: FG5 vs modèle hydro. local

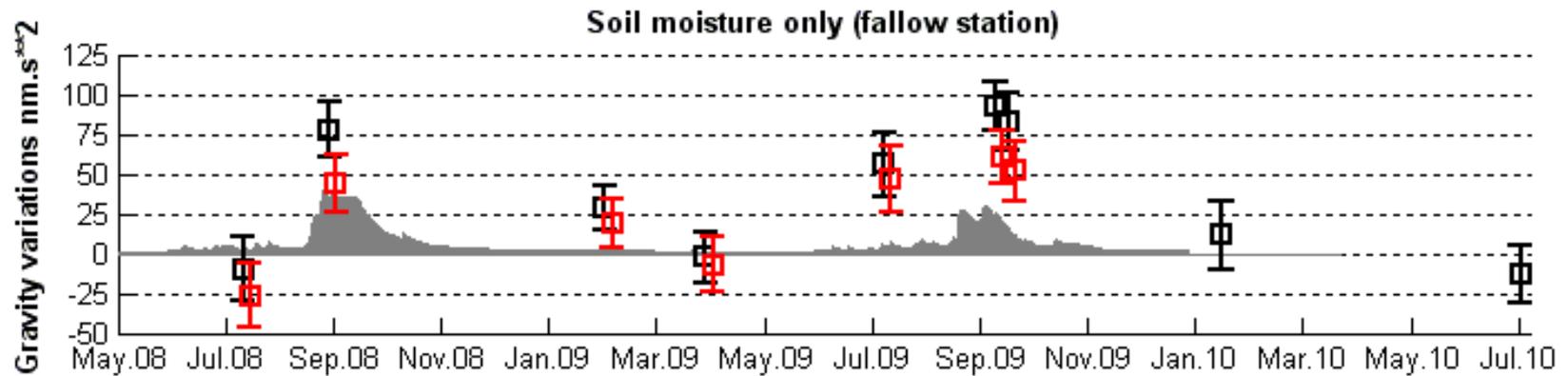
(soil water content at the FG5 site  $\leq$  soil water content at the millet site)



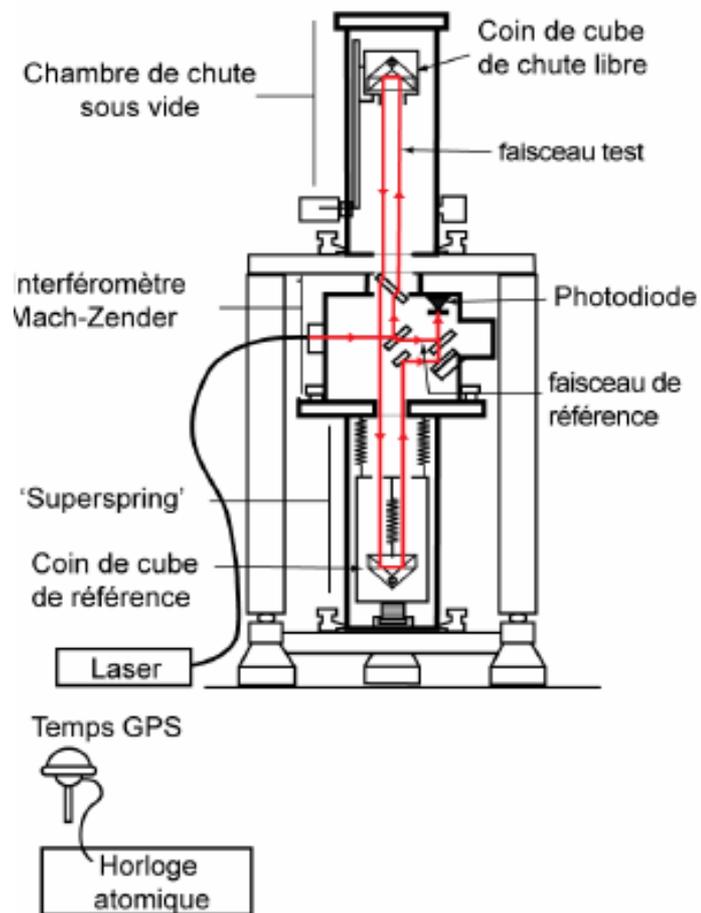
Plages de paramètres pour lesquelles le modèle gravimétrique est inclus dans les barres d'erreurs des mesures FG5. L'échelle de couleur indique l'écart type de la différence entre modèle et mesure pour chaque couple de paramètres.

# Annexes: FG5 vs modèle hydro. local

(soil water content at the FG5 site  $\leq$  soil water content at the fallow site)



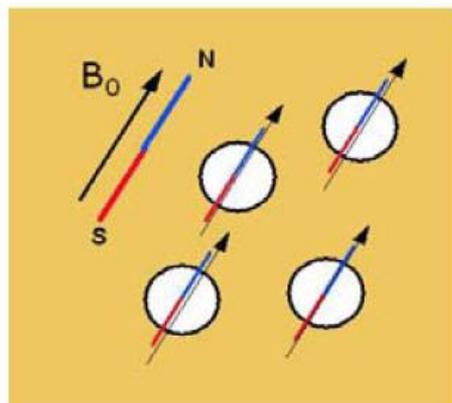
# Annexes: FG5



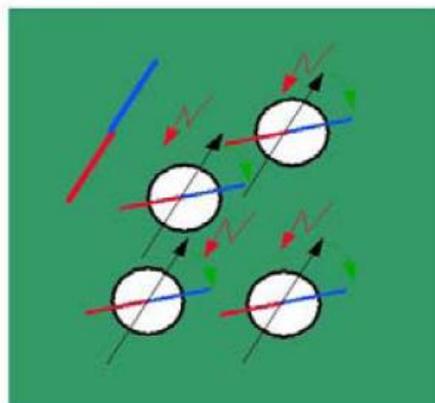
# Annexes: principe de la mesure RMP



1) Etat d'équilibre naturel



2) Emission des ondes



3) Réception du signal

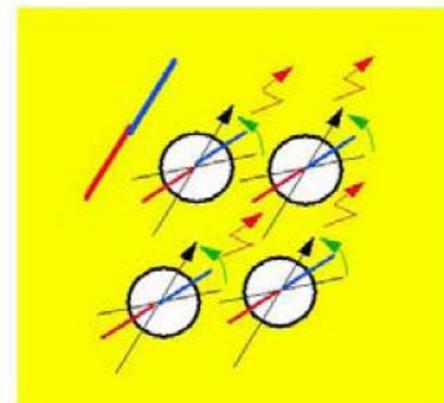
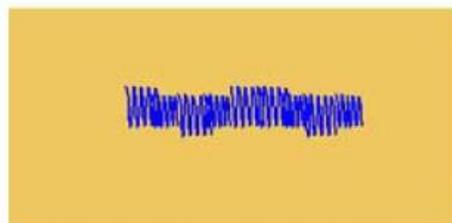
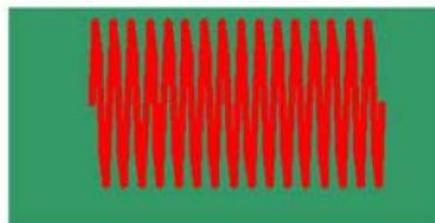


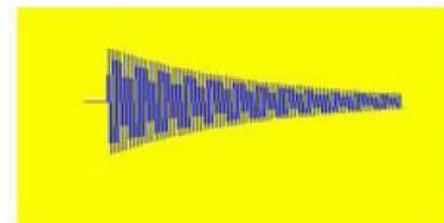
Diagramme temporel des mesures de RMP



Bruit  
électromagnétique naturel

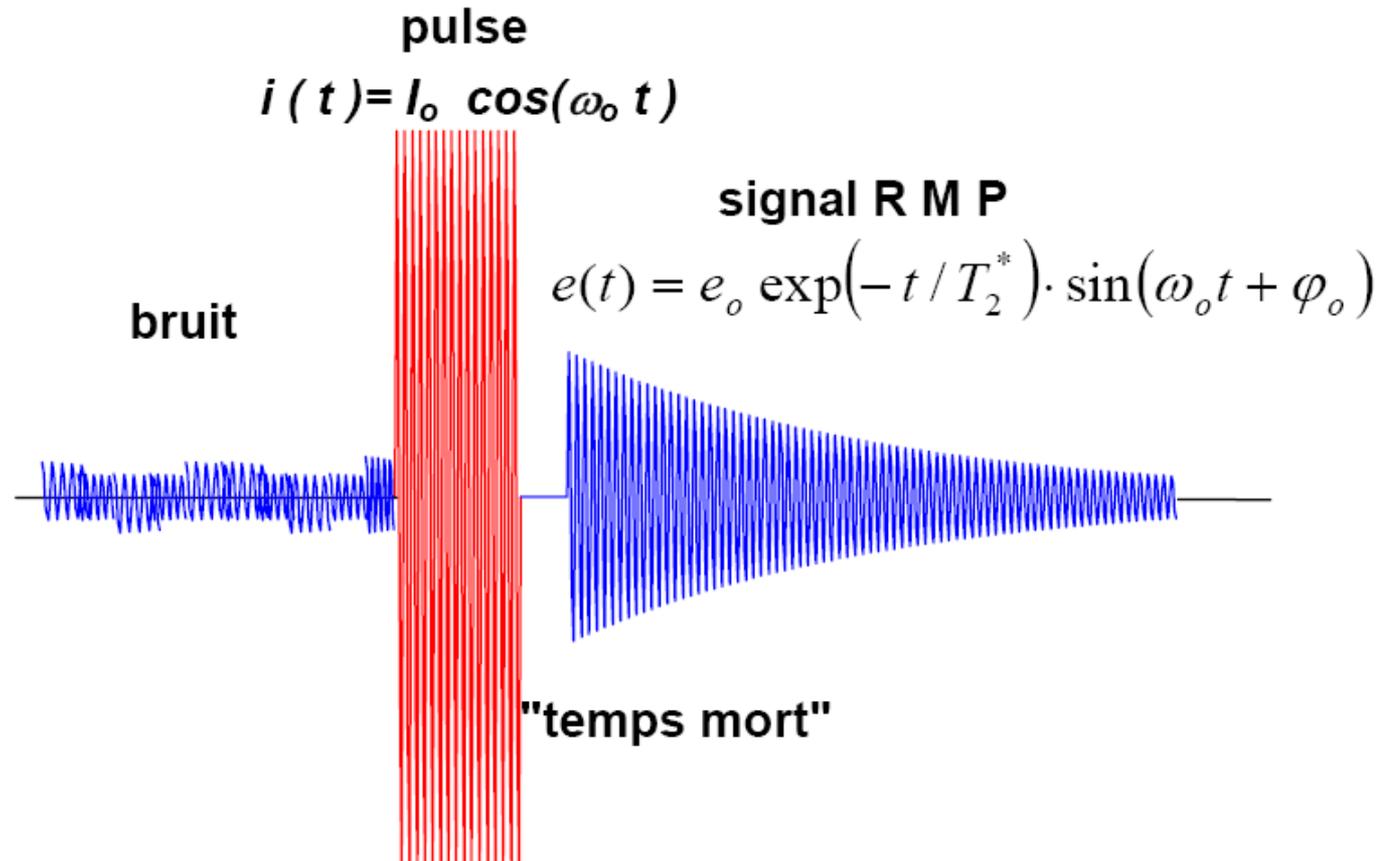


Emission des ondes



Signal reçu

# Annexes: schéma d'une séquence émission/réception en fonction du temps



# Partenaires

