

***EXPLOITATION DES AQUIFÈRES :
QUE NOUS APPRENNENT LE SITE DE PLOEMEUR
ET D'AUTRES SITES INSTRUMENTÉS ?***

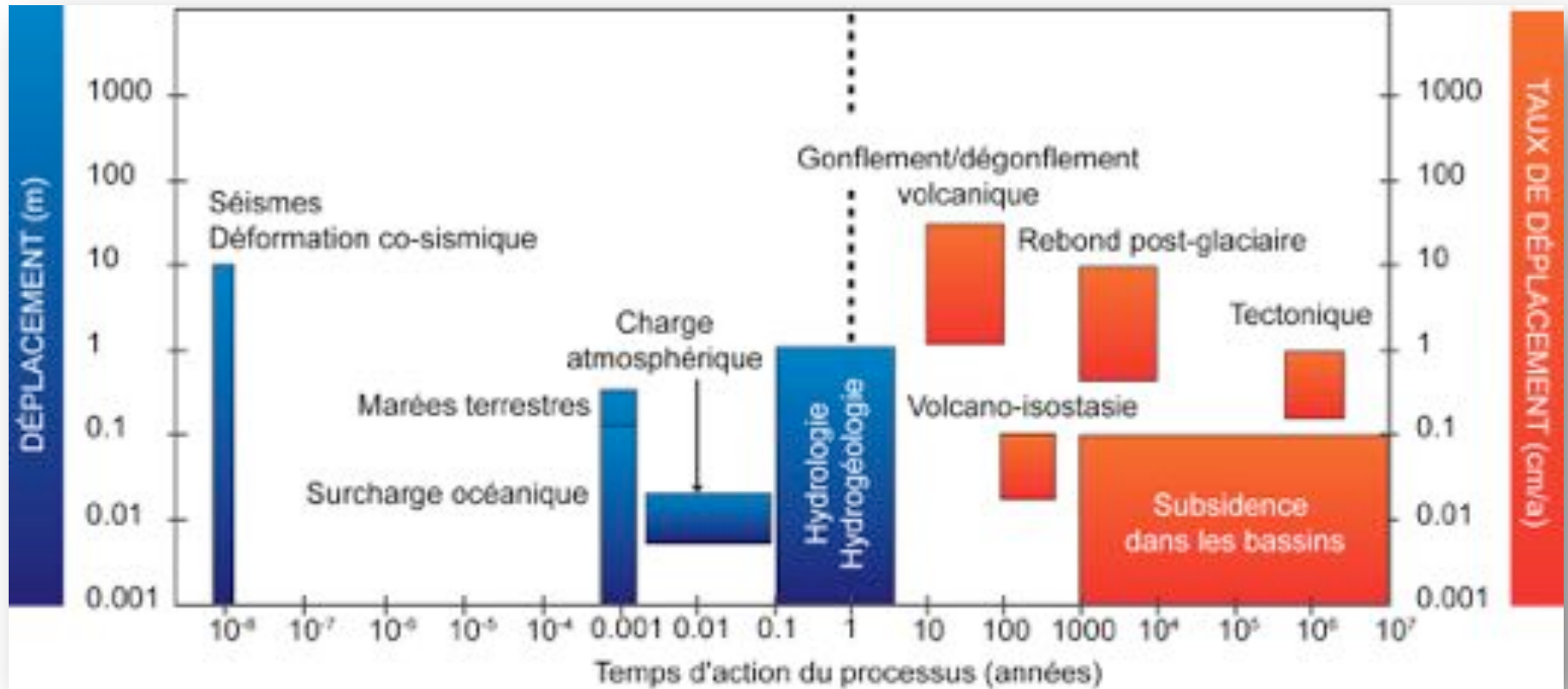
O. Dauteuil

F. Moreau

G. Biessy

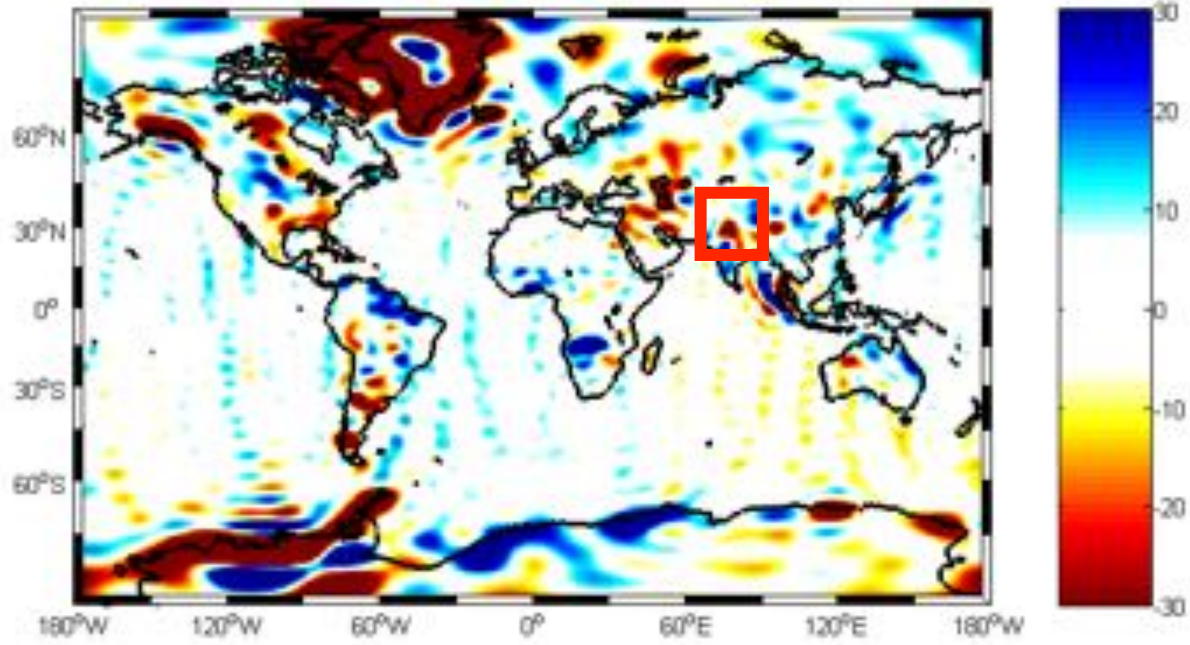
A-M Pastier

Collaborations avec O. Bour, L. Longuevergne



Processus périodiques, processus transitoires, continus, avec des caractéristiques spatio-temporelles variables.

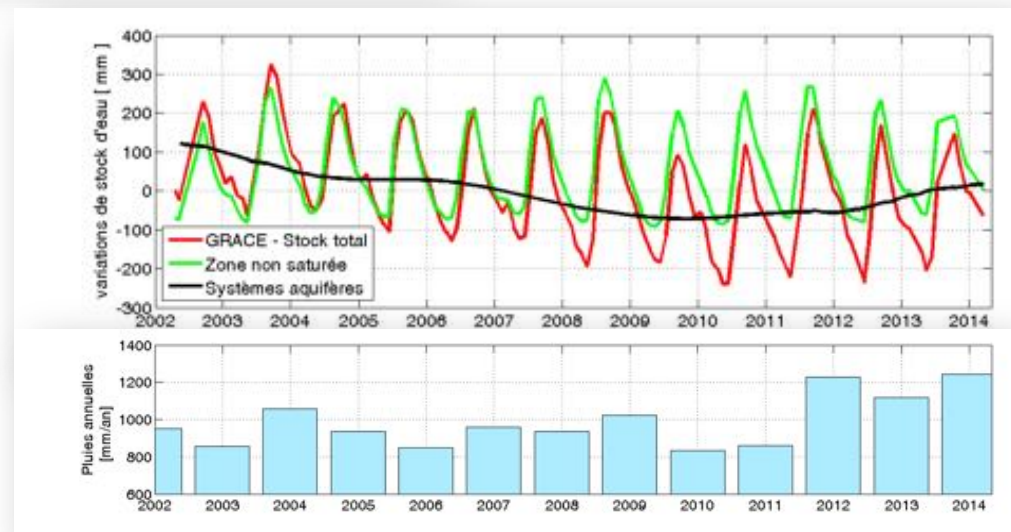
=> Complexité pour analyser le signal de déformation



Evolution du stockage long terme (mm/an) (GRACE):

=> zones en déficit d'eau et zones de stockage

- Les variations annuelles,
- les différents compartiments de l'hydrosphère

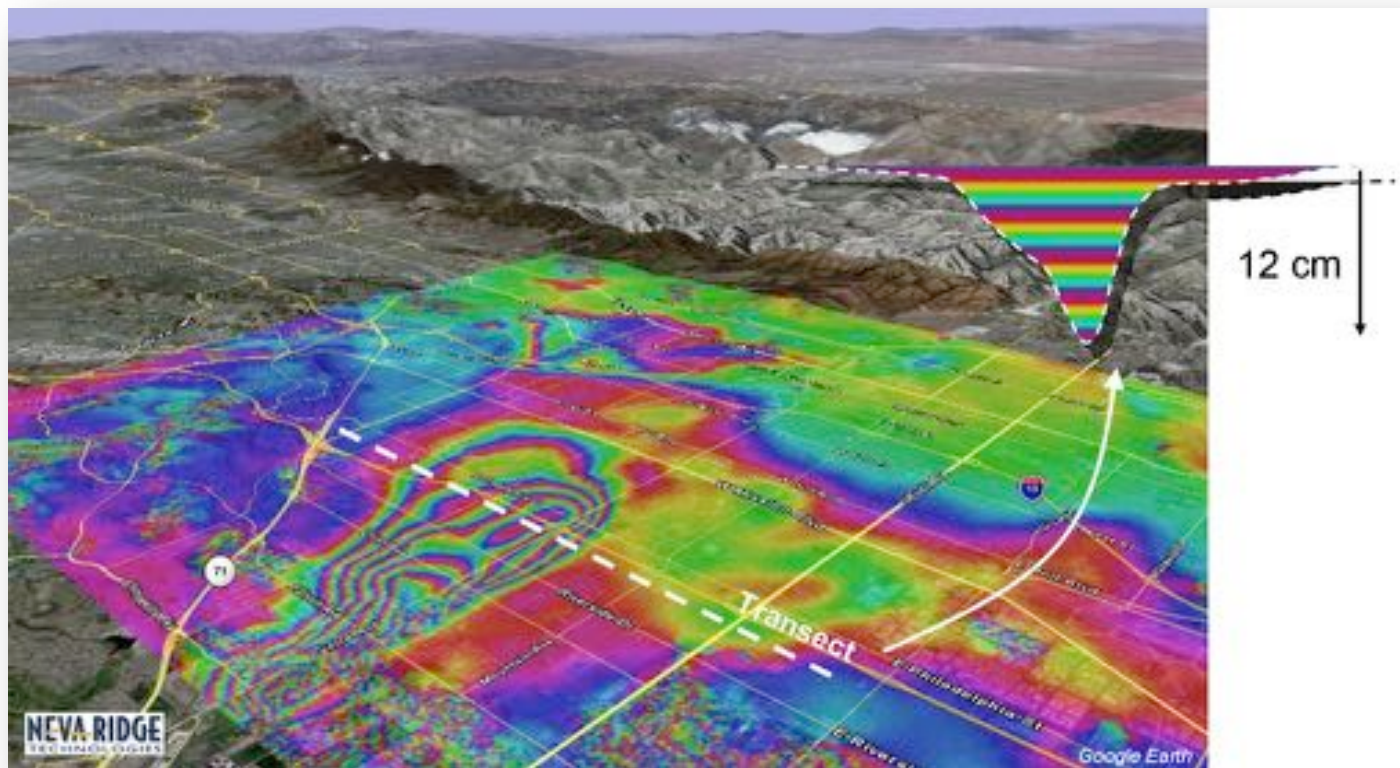


Bassin de Chino (Californie)

Entre 1993 et 1995 : jusqu'à 12 cm de subsidence induite par l'exploitation de l'aquifère sous-jacent.

Cartographie des déplacements par InSAR

=> Aquifère très réactif



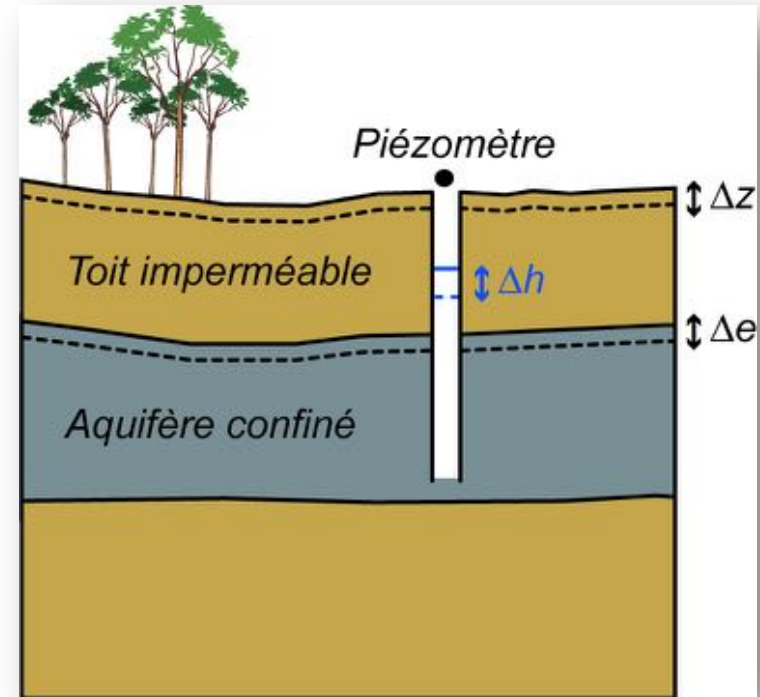
Les grands types d'aquifères

- **Aquifères libres :**

- nappes phréatiques de surface connectées à l'air libre.
- Accumulation d'eau liée à la porosité du sol et au gonflement des sols (argiles)
- Forte influence de la pluviométrie locale

- **Aquifères confinés :**

- Stockage de l'eau en profondeur dans un niveau confiné.
- Variation de pressions hydrauliques de l'aquifère
- Contrôlé par les circulations profondes à plus longs termes (annuelles à pluriannuelles)

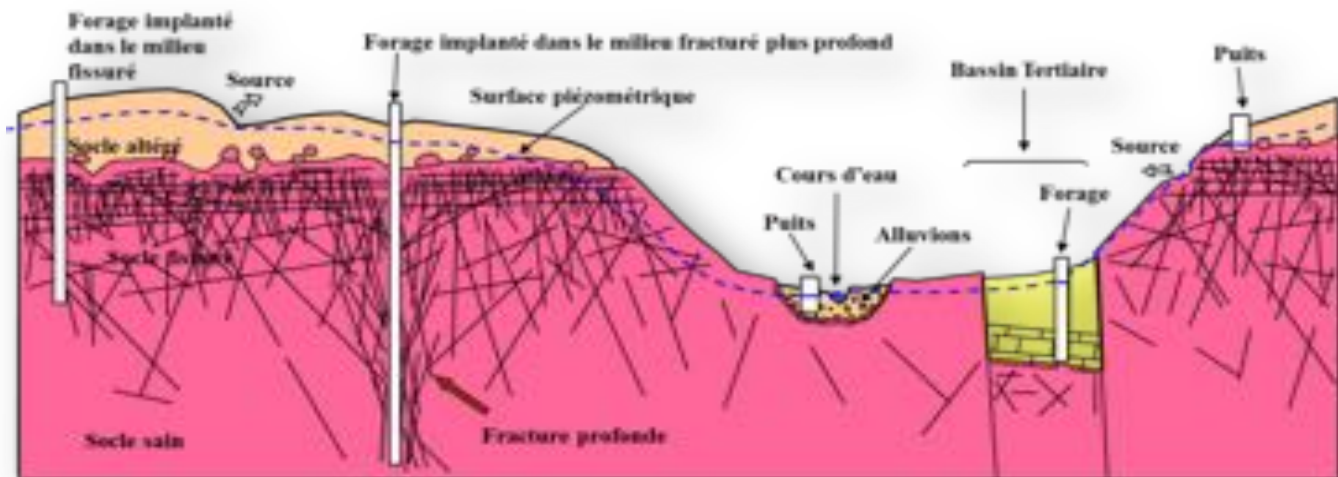
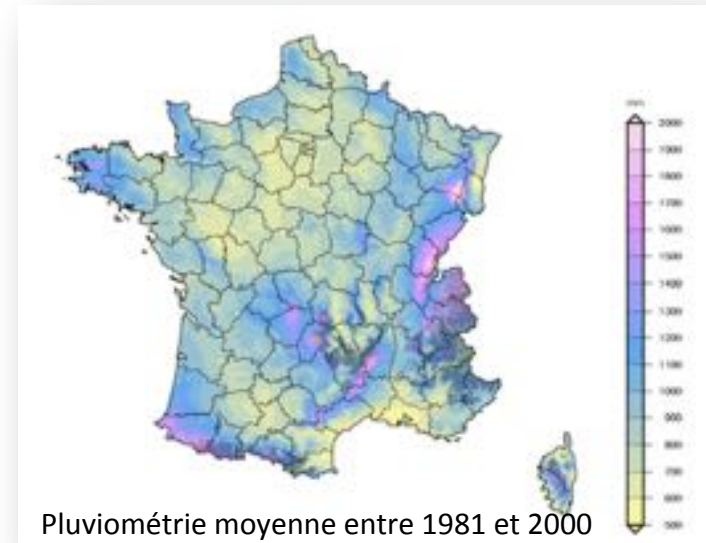


Pourquoi les aquifères bretons ?

La ressources en eau est très sensible en Bretagne : pollution, réservoirs de faible capacité, peu de stockage, pluviométrie modérée.

Caractéristiques:

- Pas de grands aquifères,
- Peu profonds,
- Essentiellement dans des milieux fracturés.

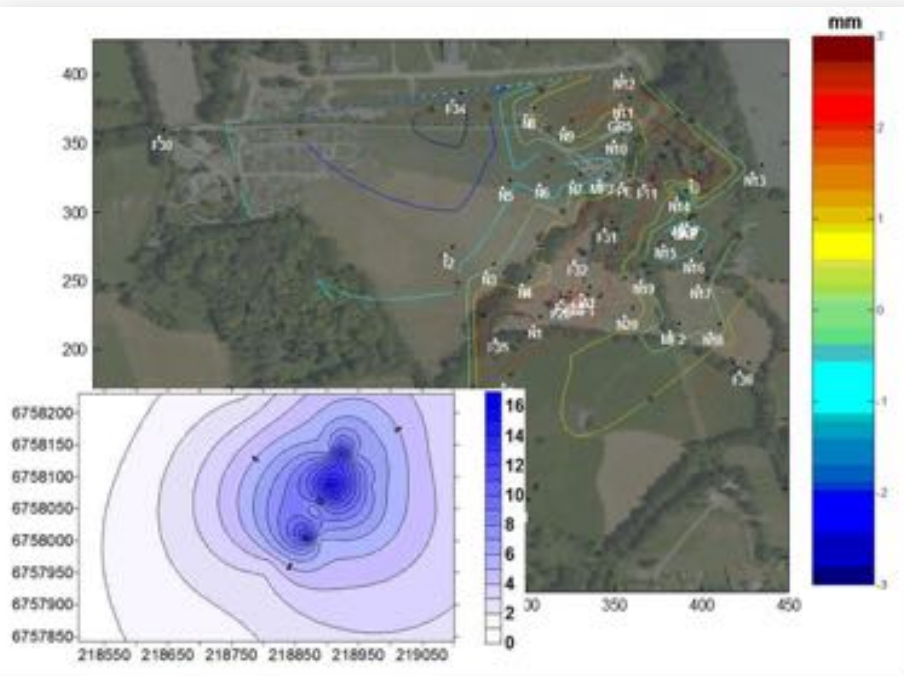


Le site de Ploemeur contexte hydrogéologique

Réseau H+



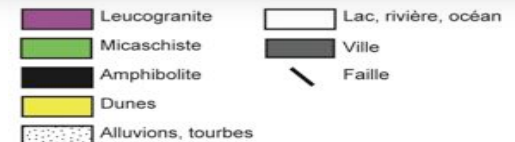
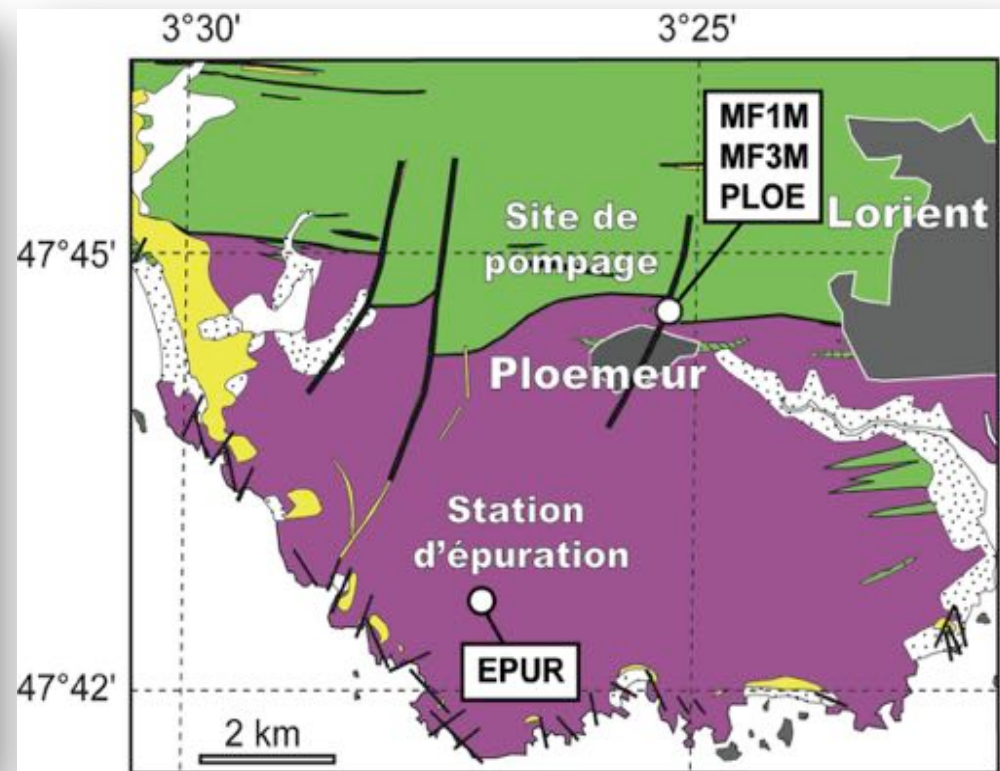
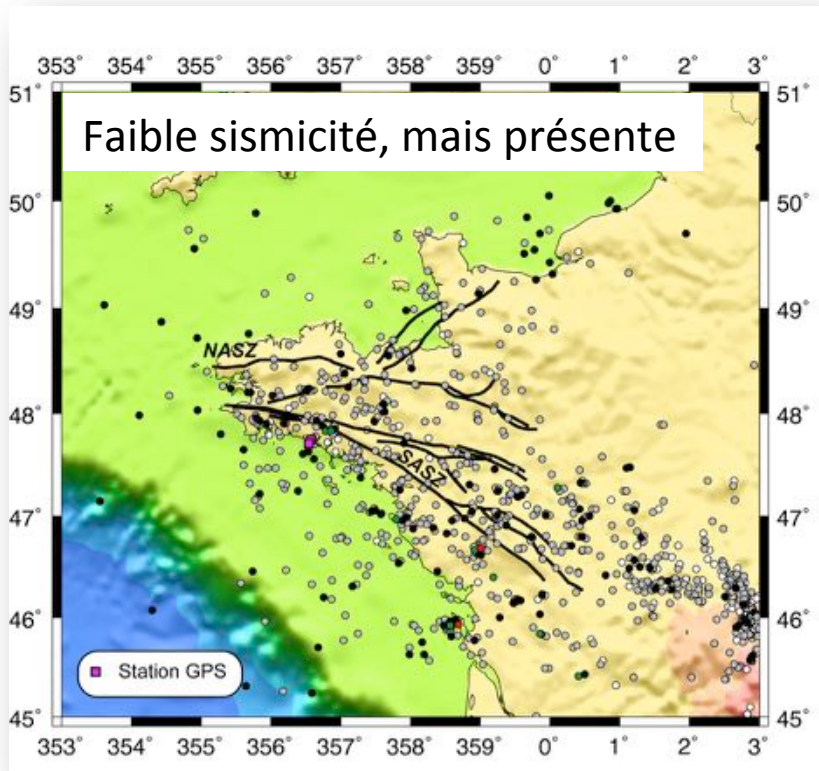
- Site exploité pour l'alimentation en eau de la ville de Ploemeur (20000 habitants) : fournit ~ 1 million de m³/an en eau potable.
- Couverture piézométrique très dense avec une cinquantaine de forages de 30 à 150 m de profondeur.
- Site du réseau national des sites hydrogéologiques H+ :



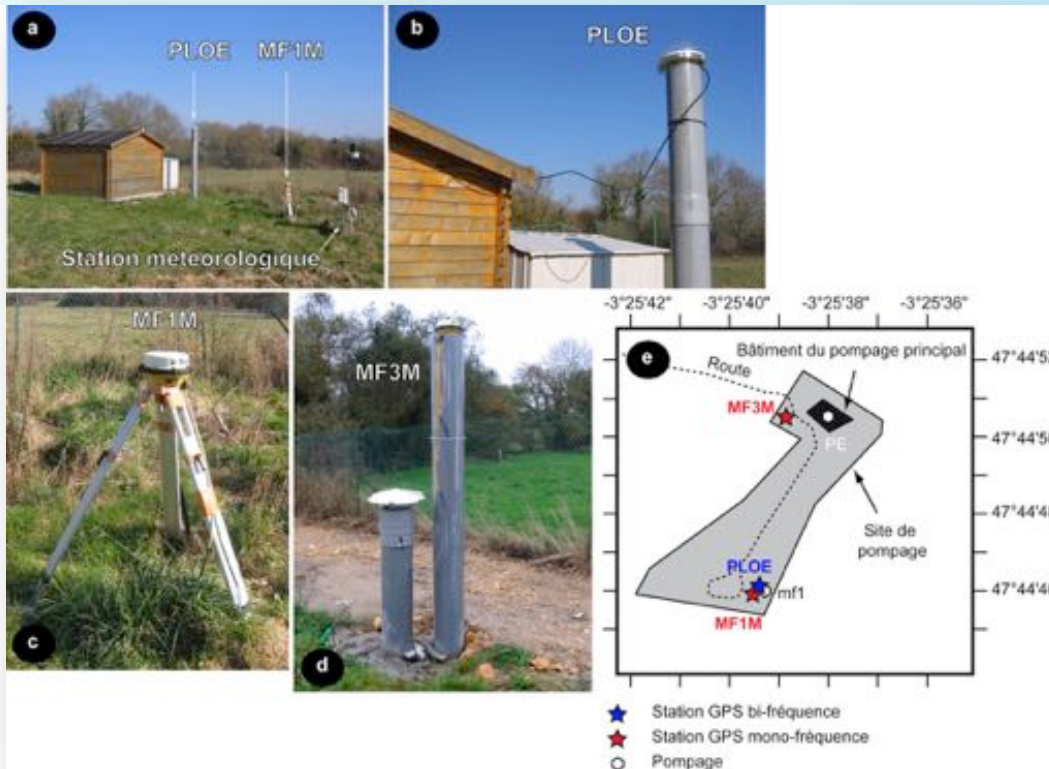
Réalisation des suivis long terme – hydrologiques, hydrochimiques et géophysiques – et expérimentations sur les propriétés hydrologiques des milieux hétérogènes.

Le site de Ploemeur: contexte géologique

- Situé au contact entre un granite et des micaschistes hercyniens avec couches d'altérites.
- Faille NNE-SSW tardive subverticale.

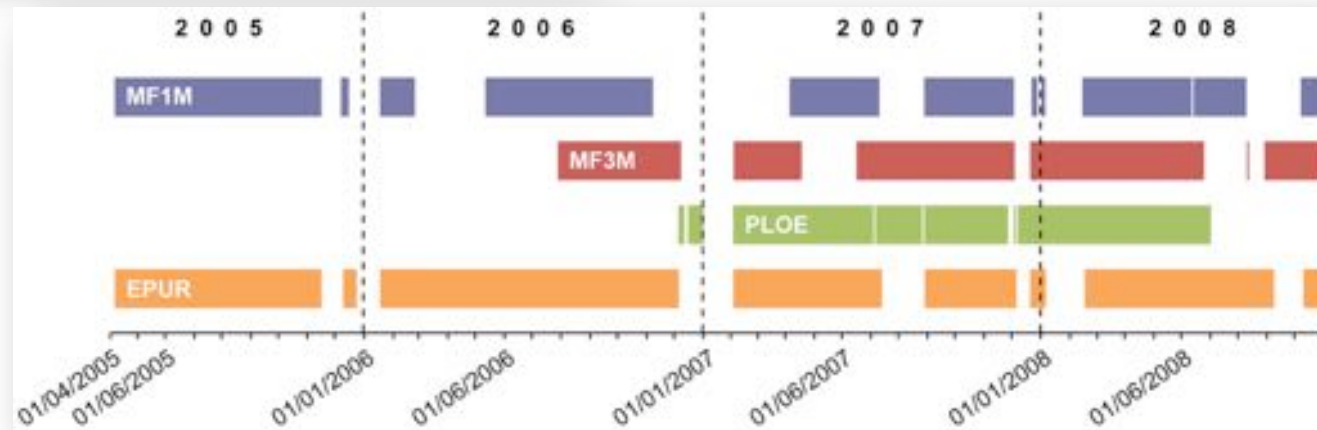


Instrumentation du site

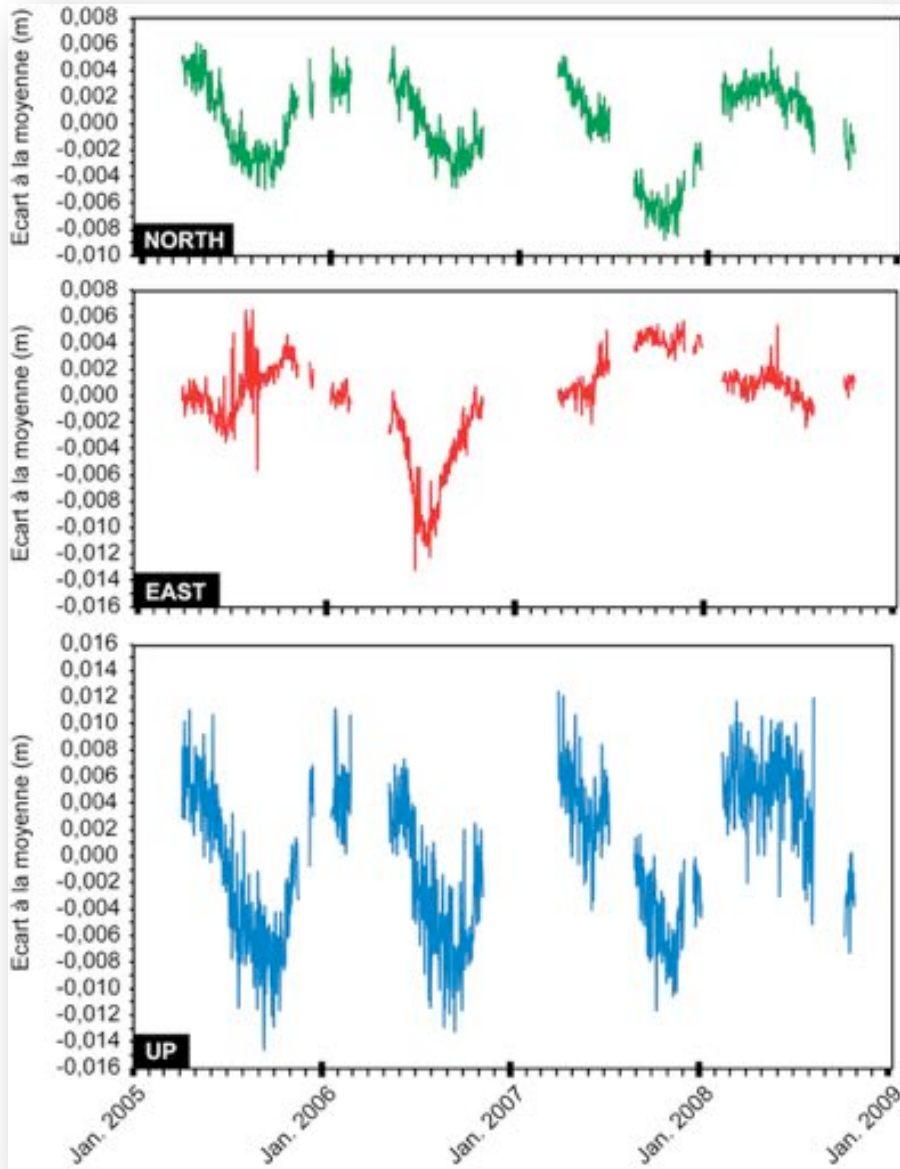


- 3 stations GPS sur le site de pompage
- 1 station GPS de référence sur le site de la station d'épuration

4 ans de données
pour la série la plus
longue



Déformation pluriannuelle



Composante N/S : déformation saisonnière significative

- 7 à 8 mm pour 2005 et 2006
- 12 mm pour 2008

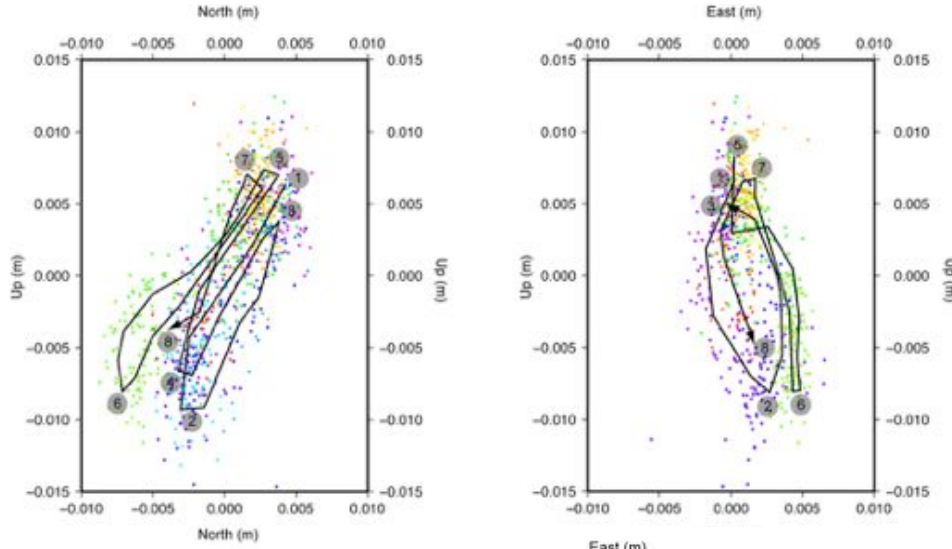
Composante E/EW : déformation significative plus complexe

- Maximum de 6 mm
- Comportement singulier entre mai et octobre 2006 : 1 cm

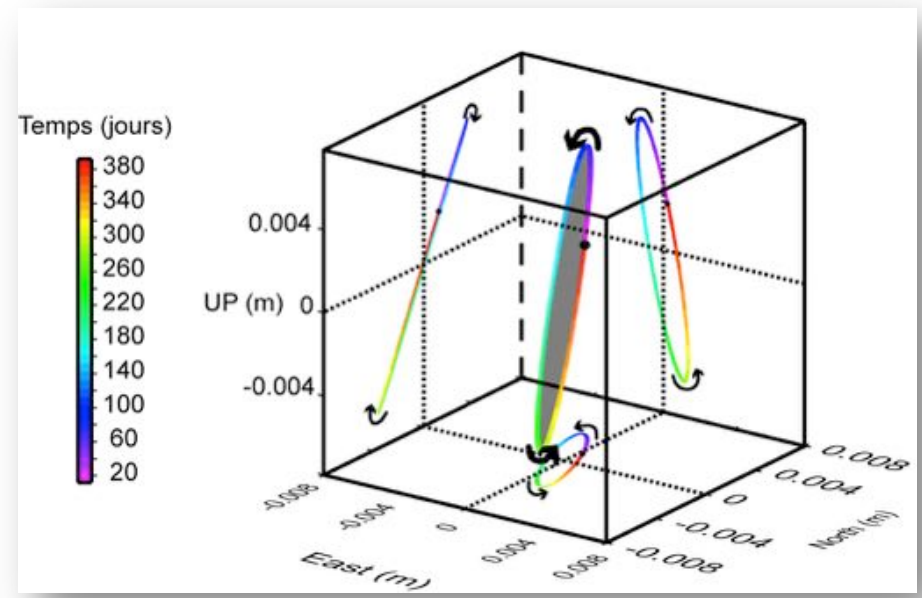
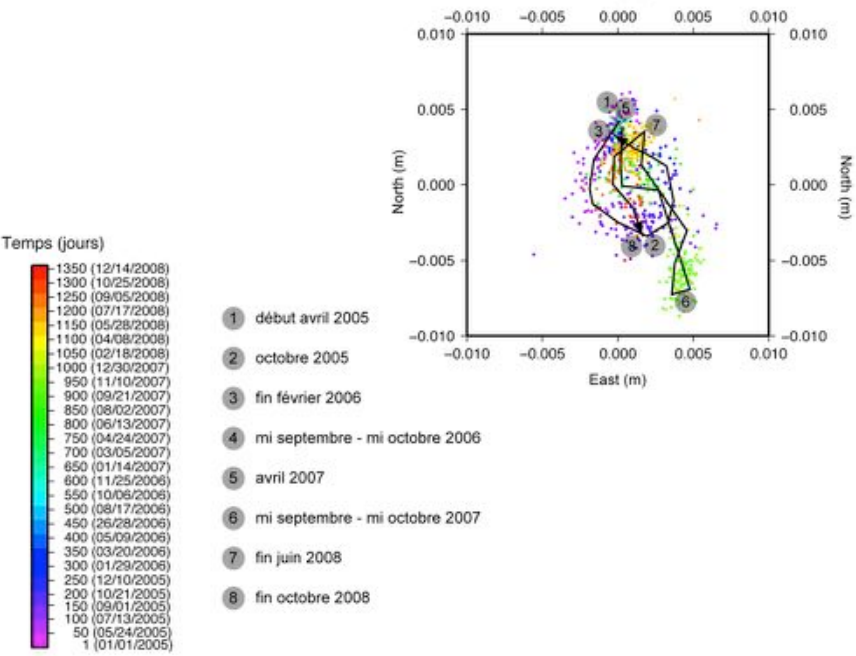
Composante verticale: déformation saisonnière importante

- 15 à 16 mm pour 2005, 2006 et 2007
- 11 mm pour 2008
- Hauts : 3 à 4 mois
- Bas : environ 1 mois
- Subsidence longue (7 à 8 mois)
- Uplift plus rapide (4 à 5 mois)

Un mouvement « périodique »

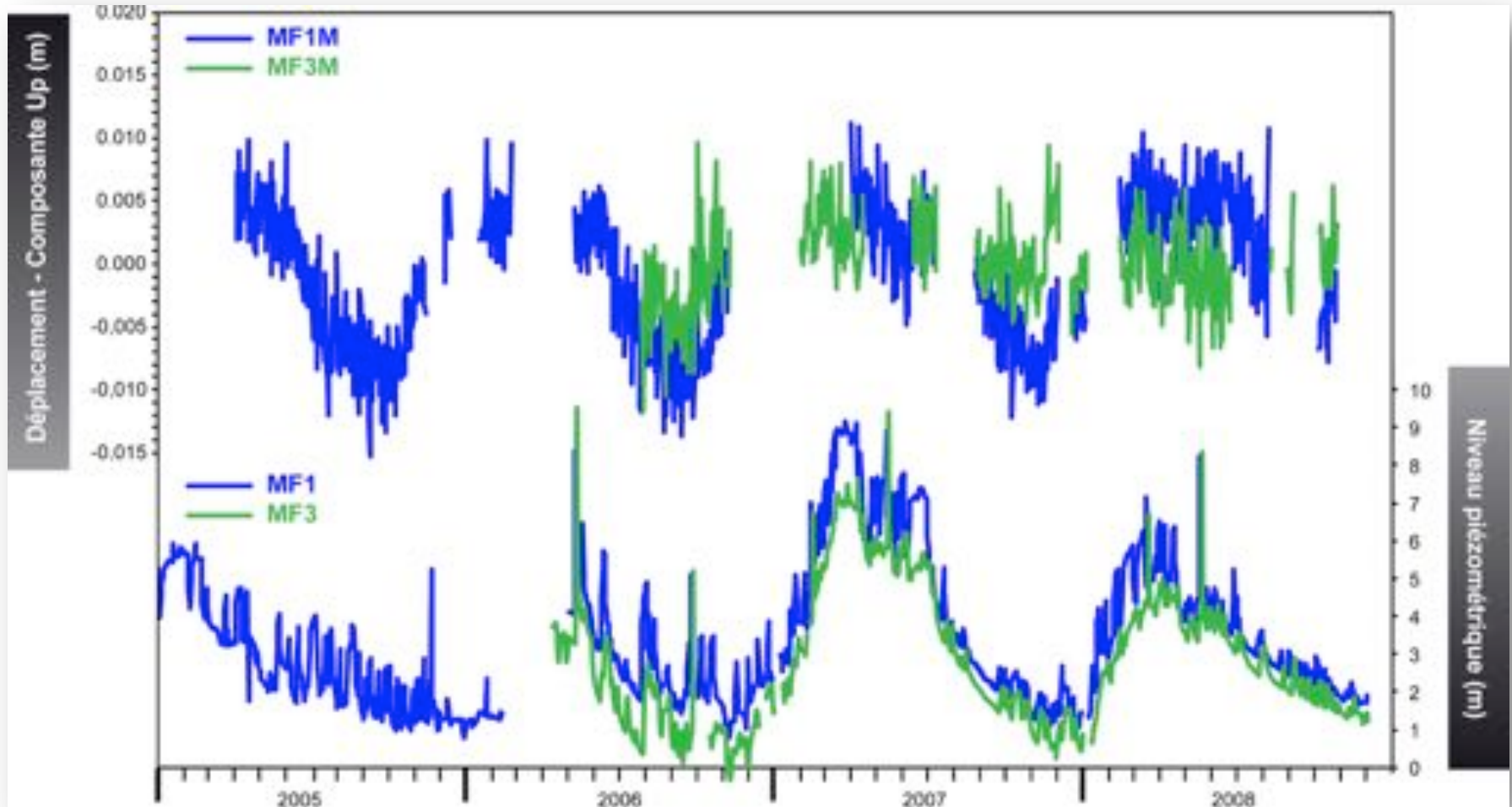


**Mouvement oscillatoire annuel
autours d'un plan
orienté N094° plongeant de 51° au
sud**



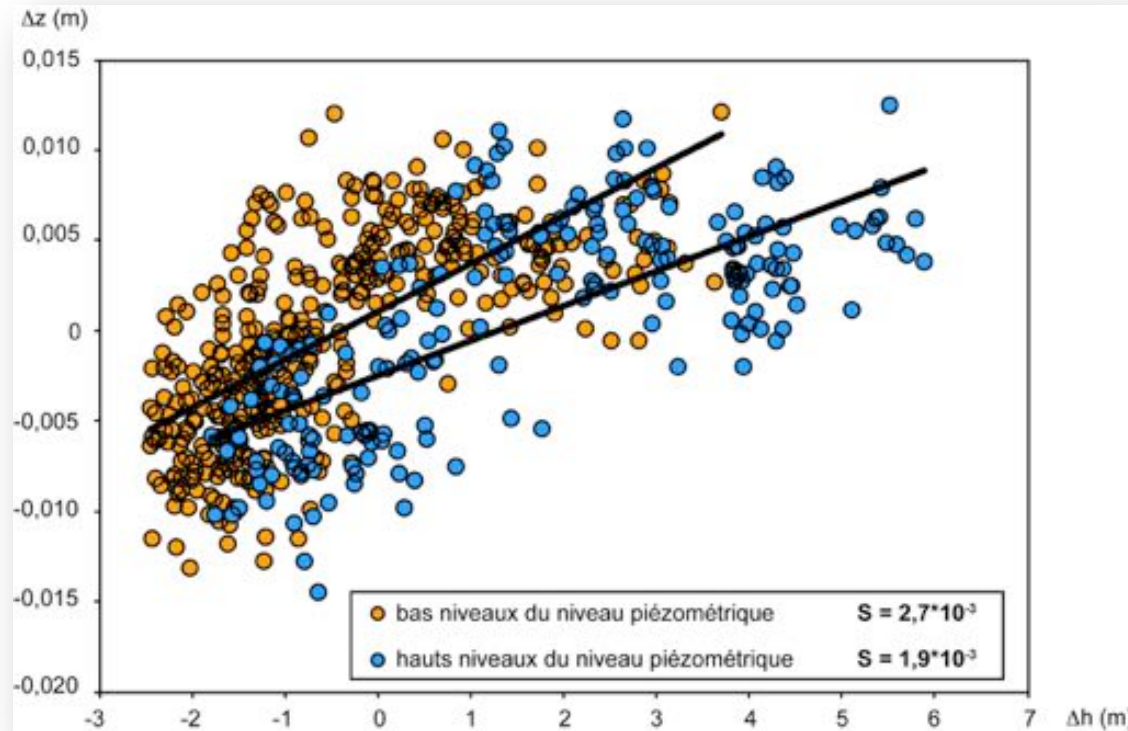
Relations Hydrologie/Déformation

Comparaison du signal de déformation avec les variations piézométriques :
=> Les deux signaux sont en « phase »



Propriétés hydrogéologiques de l'aquifère confiné

Comparaison entre les données piézométriques et les données de déplacements



Coefficient d'emmagasinement de $1,9-2,7 \cdot 10^{-3}$

Comparable aux valeurs de

- Moreau et al (2006), GPS sur 7 mois : $2,6-2,9 \cdot 10^{-3}$
- Le Borgne et al (2006), tests pompage LT : $1,6 \cdot 10^{-4} - 4,3 \cdot 10^{-3}$

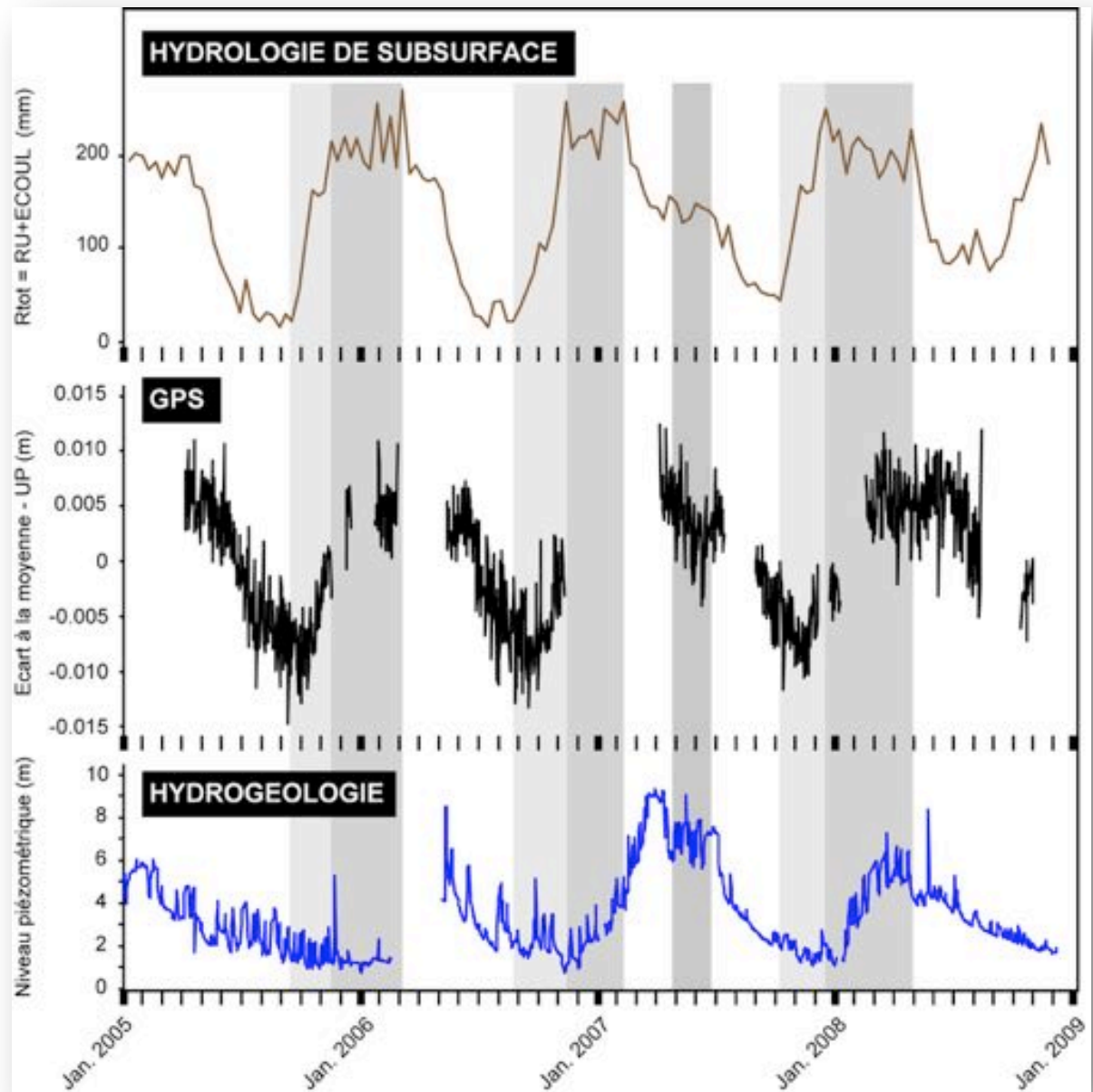
Et l'aquifère de surface ?

- le contenu en eau du sol diminue
- subsidence
- le niveau piézométrique baisse

- le contenu en eau du sol augmente
- inversion : uplift
- le niveau piézométrique continue de baisser

- le sol est saturé en eau
- l'uplift continue
- le niveau piézométrique remonte

Accès aux différents compartiments



- **Bilan de la déformation:**

- Déformation verticale saisonnière importante (de l'ordre du cm)
- Déformation horizontale significative orientée SSE-NNW (cm)

- **Les processus:**

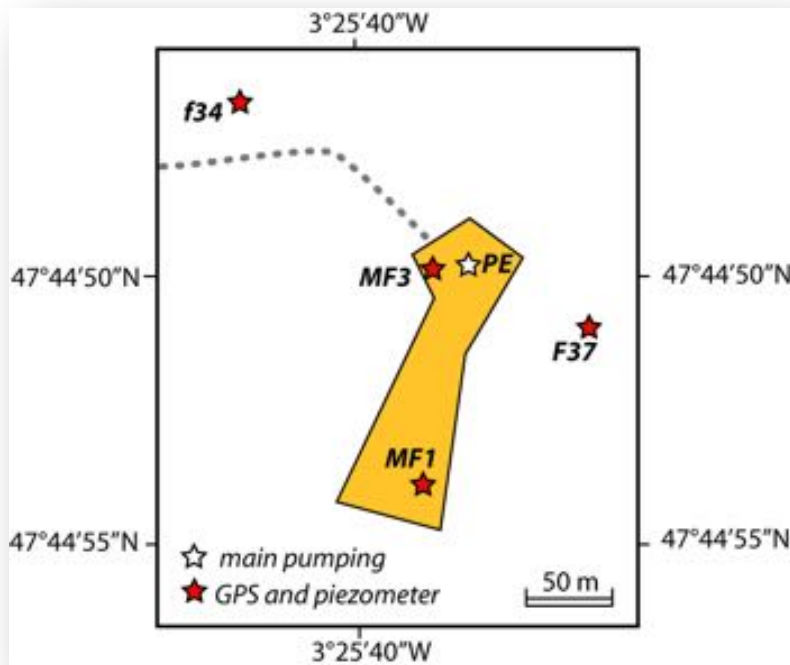
- Relations entre déformation verticale et variations hydrogéologiques
- Influence probable des variations hydrologiques de subsurface
- Rôle du compartimentage des aquifères
- Accès de manière indépendante à certaines propriétés de l'aquifère

- **Nécessité d'avoir des séries temporelles longues**

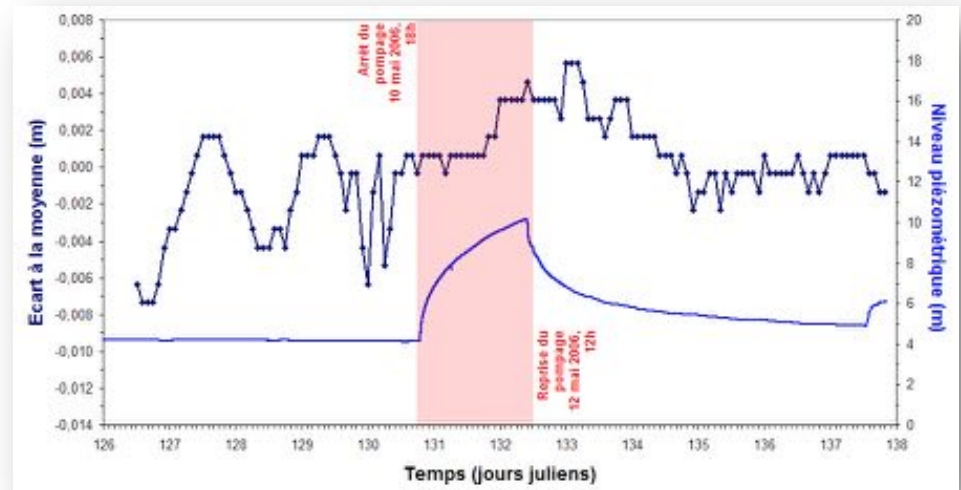
- **Couplages avec d'autres données: piézométrie, météorologie, structure et géométrie de l'aquifère....**

Conditions de l'expérience :

- Expérience d'arrêt de pompage pendant 40 heures, puis reprise du pompage.
- 7 récepteurs sur le site, près de piézomètres.



Expérience d'arrêt de pompage



Après la sollicitation, stabilisation du signal

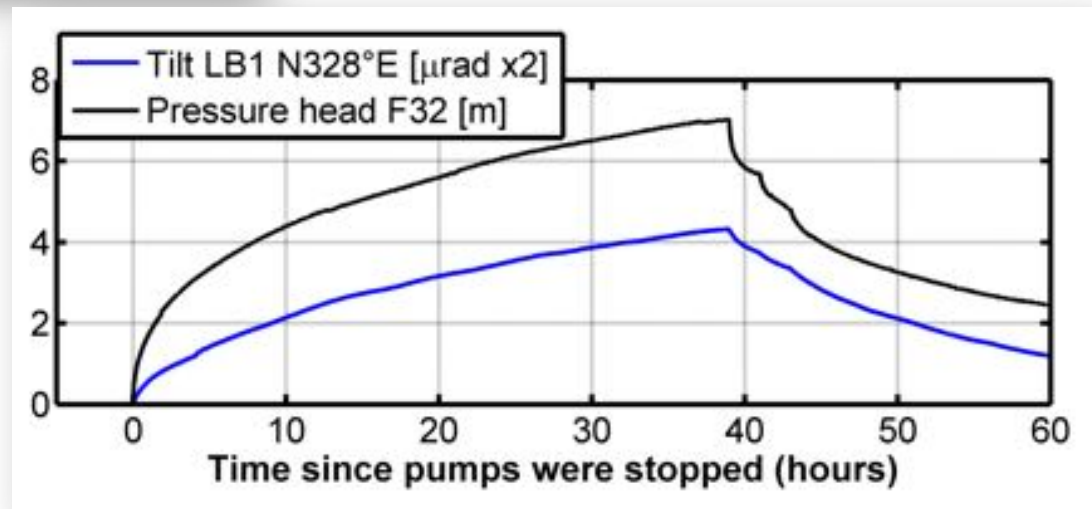
Déformation locale



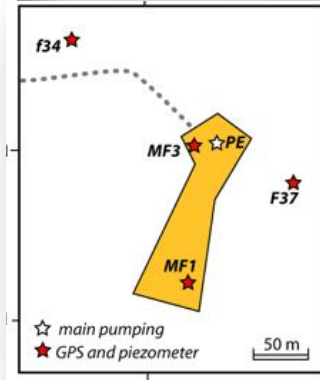
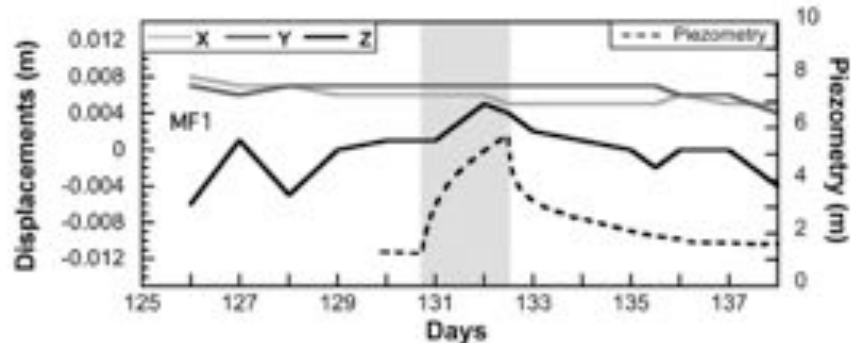
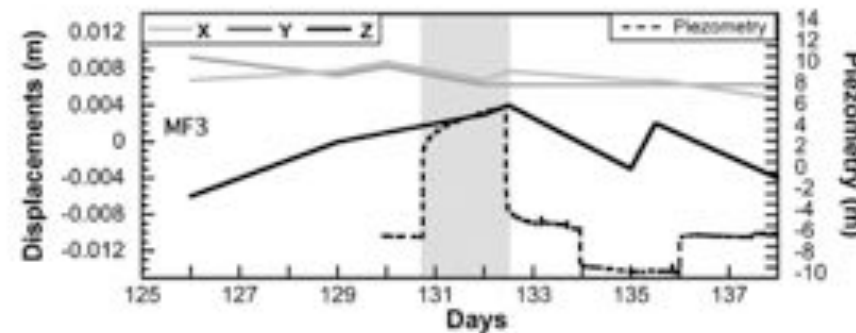
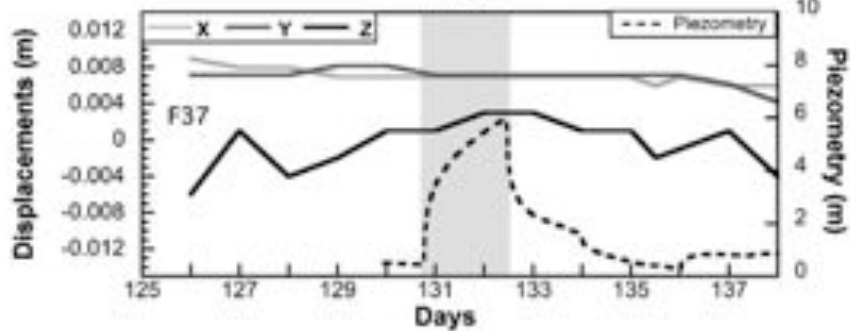
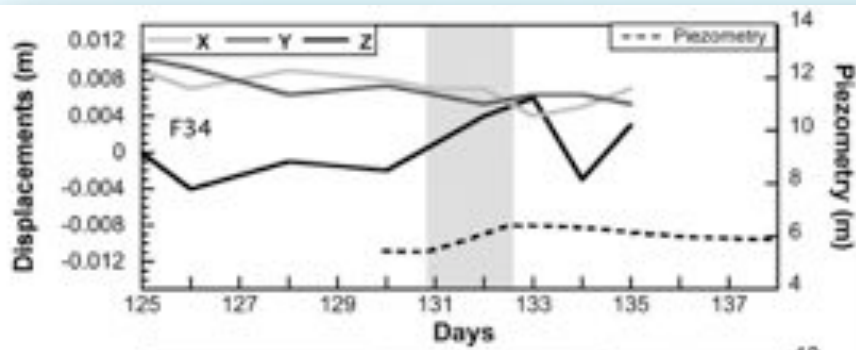
Carte des déplacements verticaux suite à un arrêt de pompage au dessus d'une fracture active (nivellement)

Variation de l'inclinaison pendant l'arrêt et la reprise de pompage

Inclinométrie fournit une information précise



Comportement des différentes stations

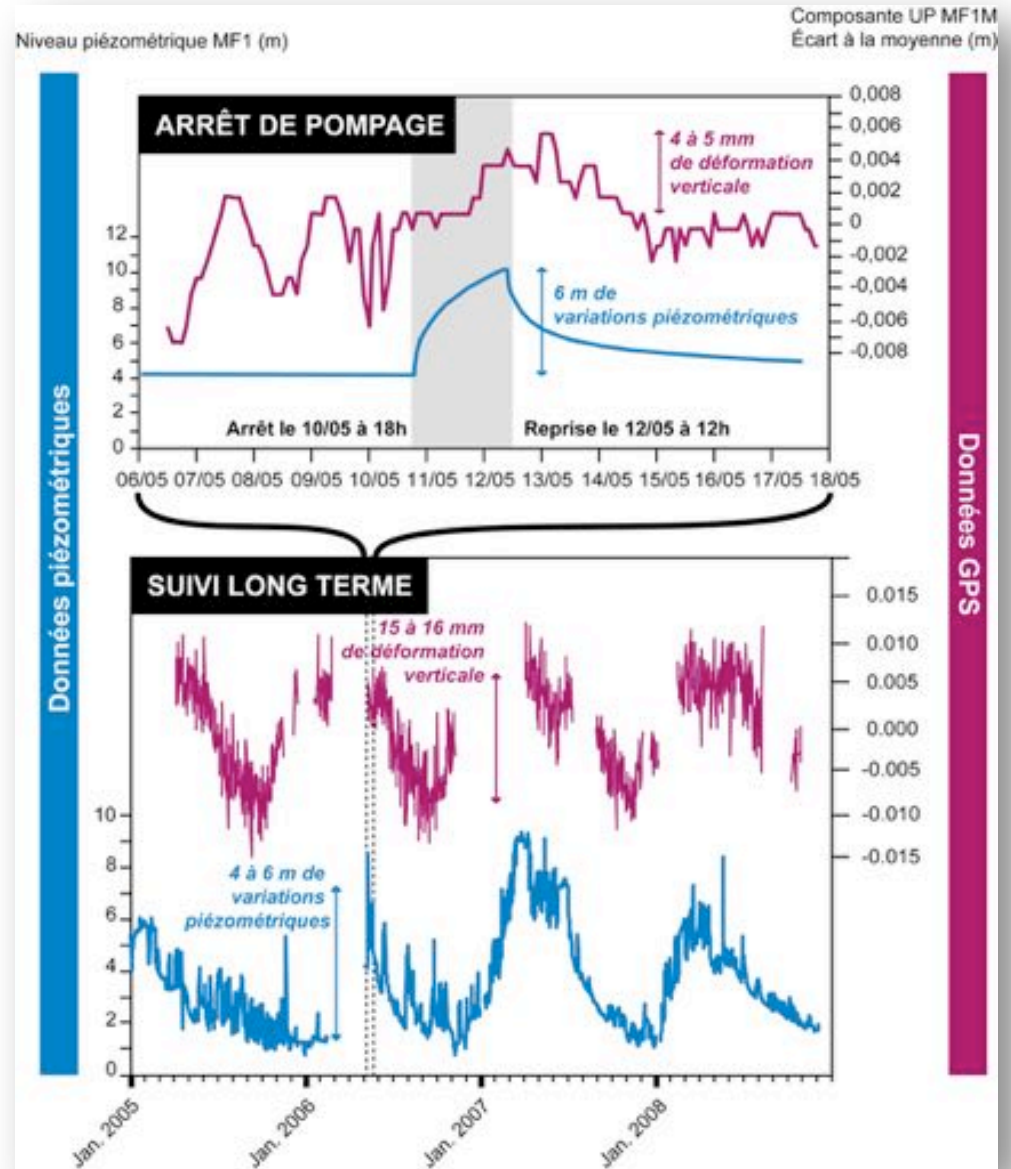
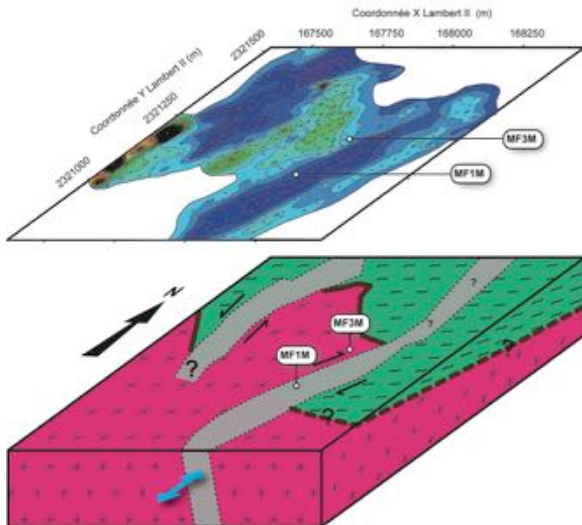


- Comportement hydrologique différent en fonction de la position du piézomètre (distance, orientation): de <1 m à 12 m
- Déformation du sol différente selon le site: amplitude et forme de la réponse.
 - Pas d'impacts sur la composante horizontale
 - Composante verticale entre 3 et 6mm

Relations entre hauteur piézométrique et élévation complexes.

Impact de la durée de sollicitation

- Pour une même variation de charge hydraulique, comportement différent du système.
- La durée et le mode de sollicitation contrôle la réactivité du système
- **Origines:**
 - Différents processus sollicités
 - Propriétés hydromécaniques
 - niveaux différents mis en cause



Le Delta de l'Okavango: un aquifère régional



✓ le second plus grand delta intérieur du monde.

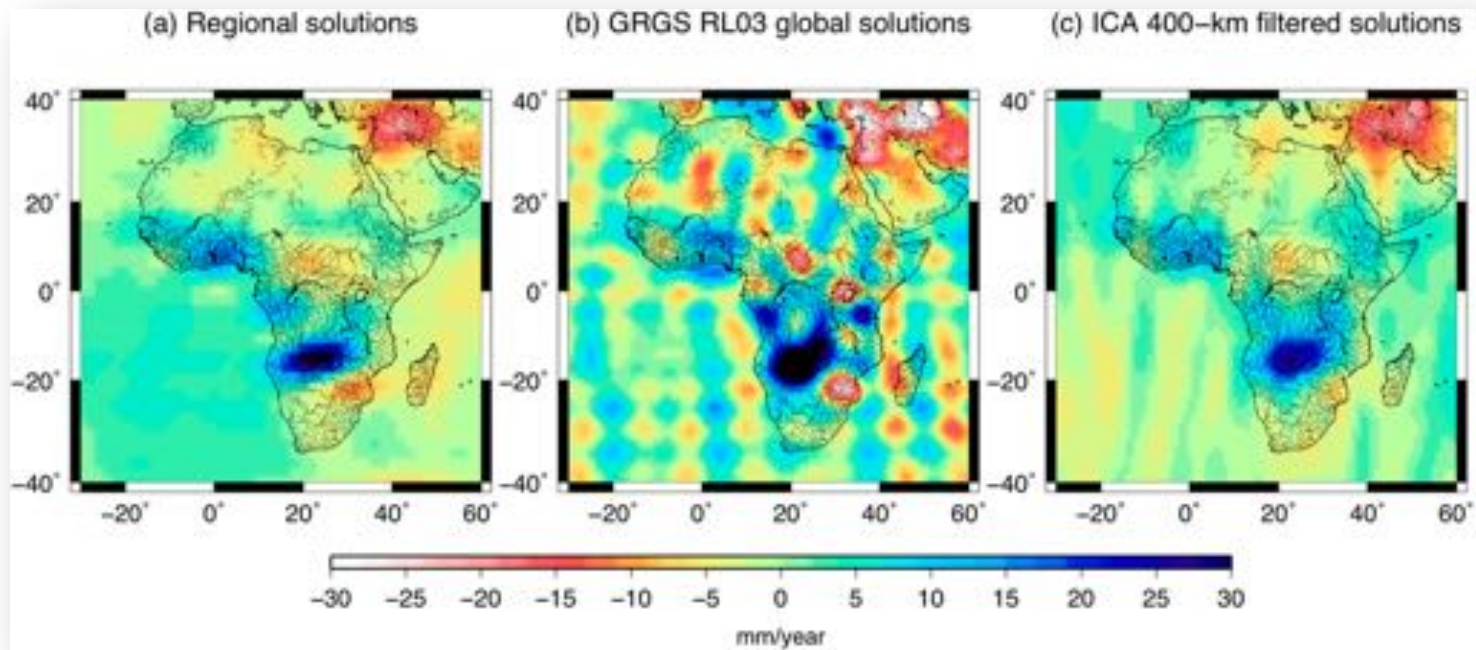
✓ environ 11000 km³ d'eau irriguent 15000 km² de désert. Les eaux inondent la région sur une hauteur de 1 à 4 m.

✓ Il est contrôlé par des failles normales formant un graben remplis de sédiments récents.

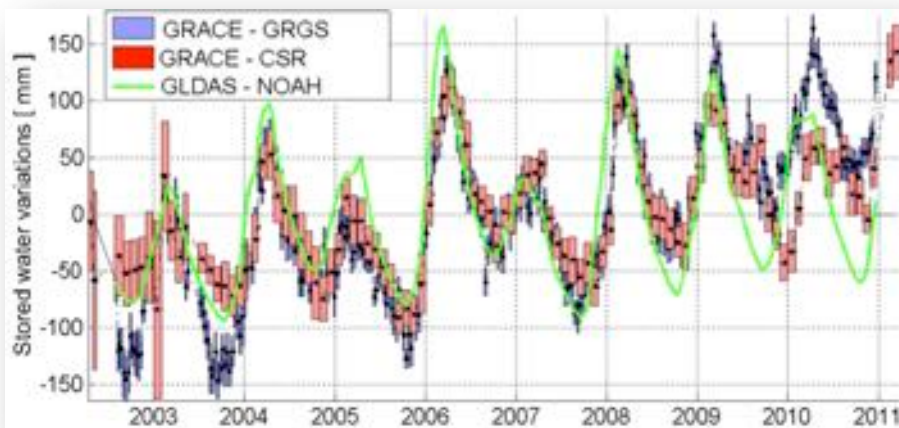


(thèse A-M Pastier)

Une zone de stockage d'eau

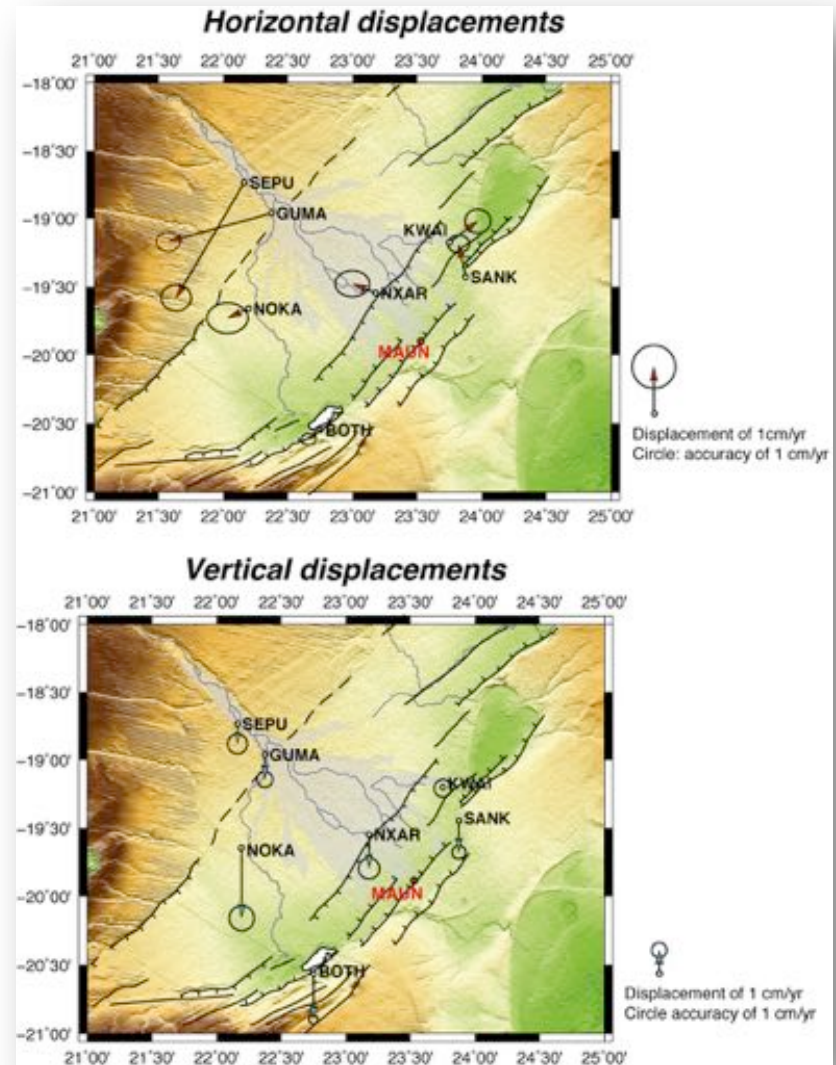


Changement des masses d'eau entre 2003 et 2012 vue par GRACE (Ramillien et al 2014)



Une zone de stockage d'eau depuis plus de 10 ans.
Mais des variations annuelles importantes (L. Longuevergne)

Déformation interne au delta Entre 2010 et 2012

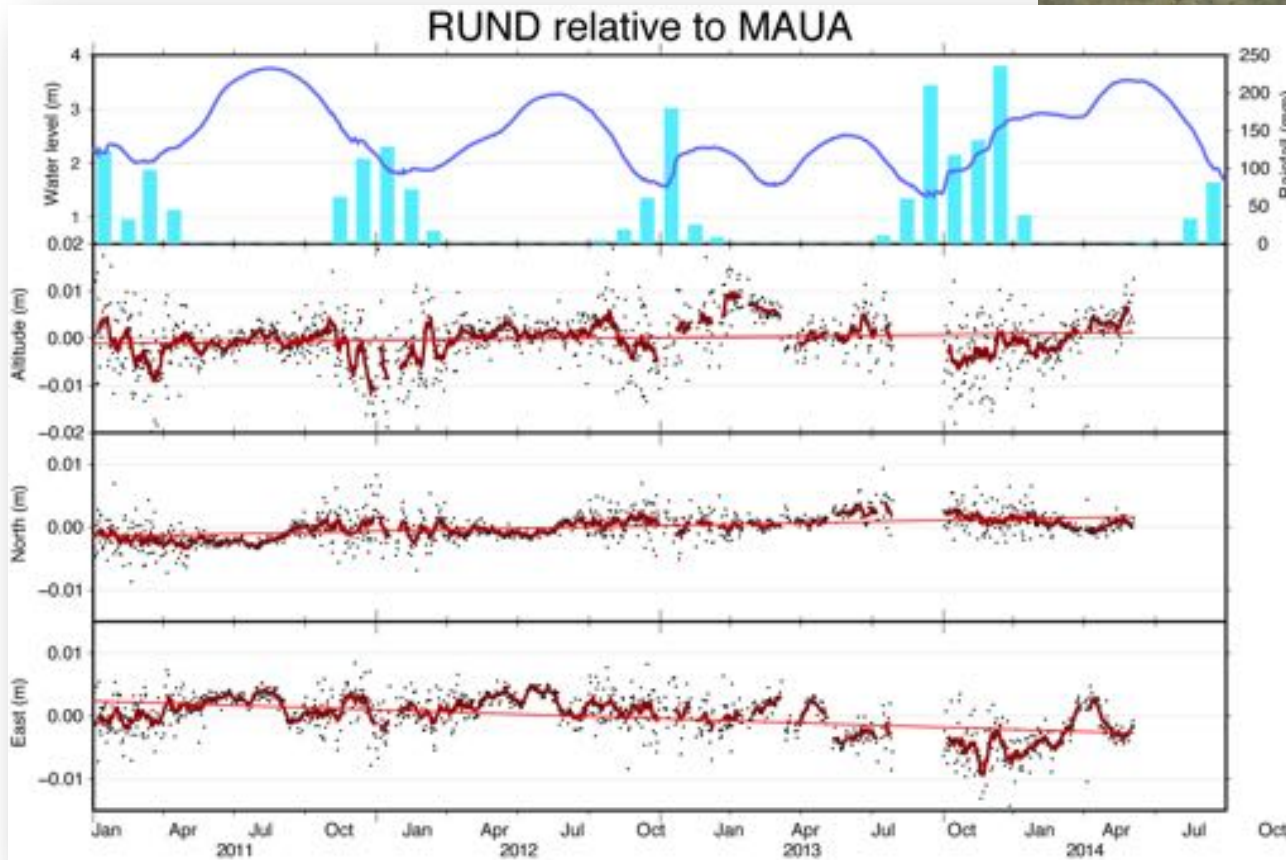
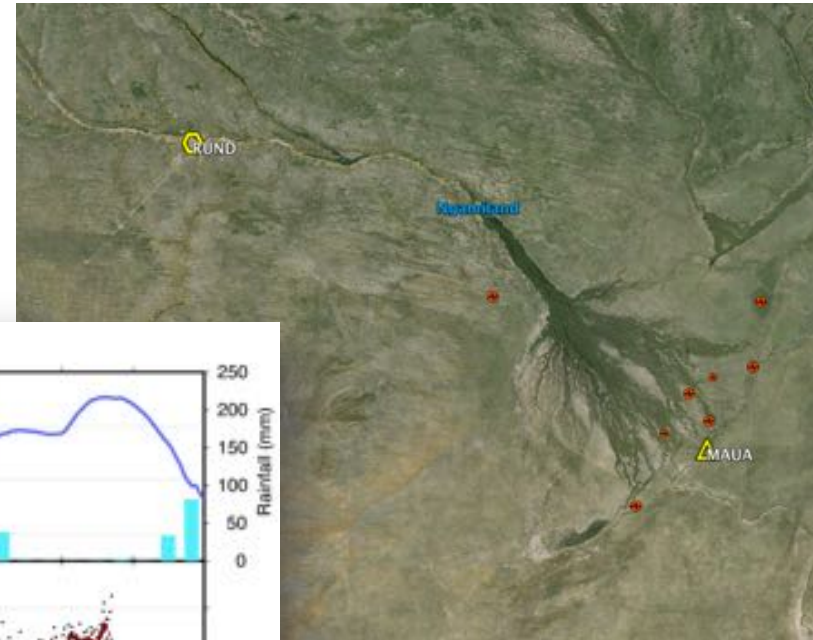


Résultats préliminaires

Série temporelle sur 4 ans:

- Tendances avec faibles déplacements
- Composante « périodique » du signal.

Analyse en cours



Complément avec
l'InSAR
Collaboration avec
B. Fruneau

- La déformation du sol induite par les variations de charge hydraulique peut être **significative**, sur la composante verticale (> cm), MAIS aussi sur la composante horizontale (~ cm).
- Les outils GNSS enregistrent ces déformations, et apportent des contraintes sur les propriétés hydromécaniques des différents compartiments d'un système naturel.
- Couplage impératif avec **d'autres données** (piézomètres, gravimétrie spatiale ou terrestre,) pour déconvoluer le signal pour accéder aux processus.
- Nécessité d'avoir des **séries temporelles longues** pour dégager les tendances des événements ponctuels.

Un défi : travailler sur le court terme, à l'échelle de l'événement