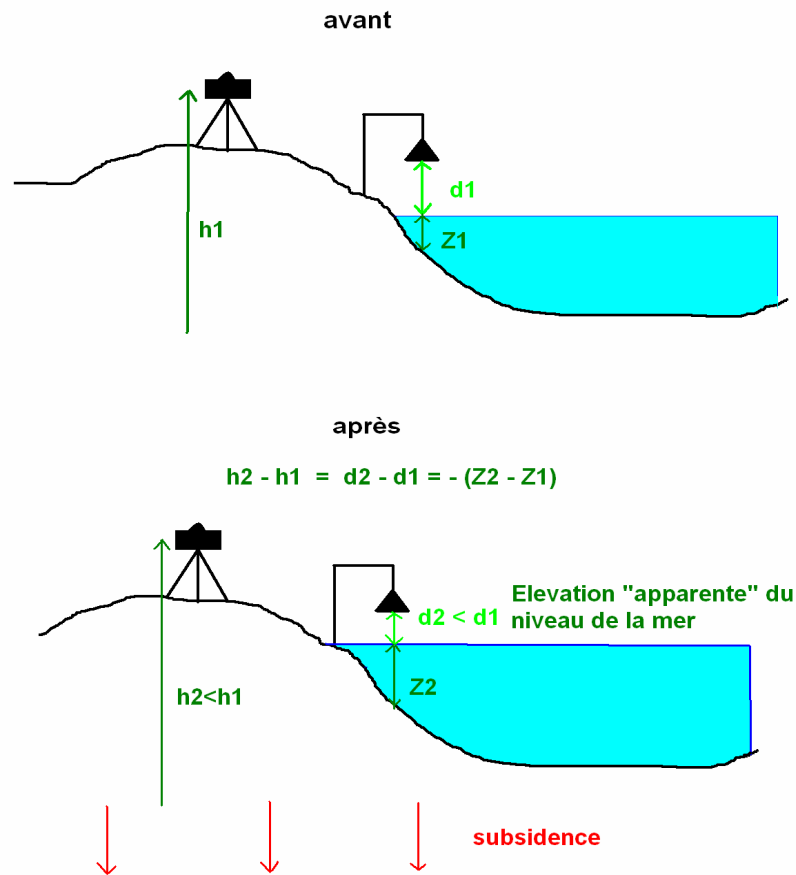


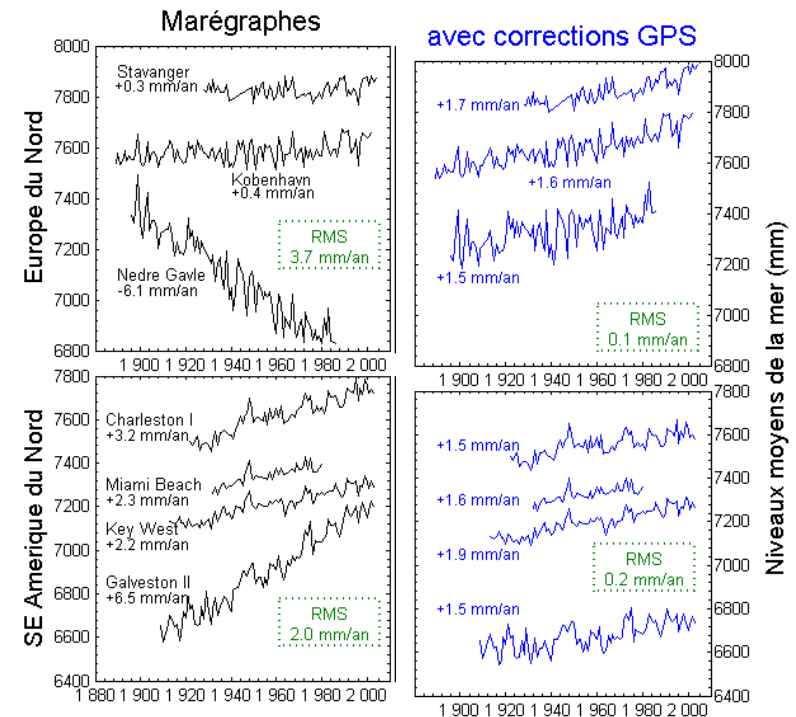
Apport de la réflectométrie GNSS à l'étude des variations du niveau des mers

Préambule

Nécessité de prendre en compte les mouvements du sol lors de l'étude des variations de hauteur de mer.



Pas de variation absolue du niveau de la mer



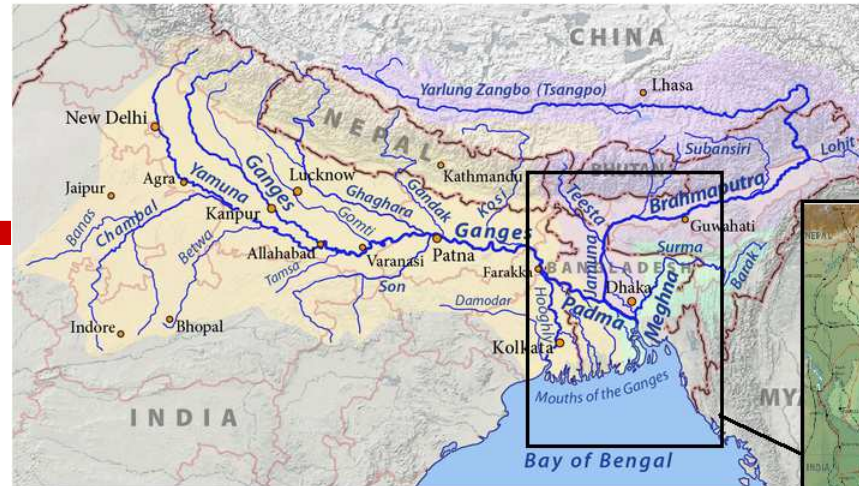
@Woppelmann

Contexte

Projet Band-Aid

Vulnérabilité côtière au Bangladesh

160 millions d'habitants sur $\frac{1}{4}$ de la superficie de la France, dont 80% vivent à moins 20 m d'altitude dans le delta Gange-Brahmapoures-Meghna



Inondations saisonnières

Elevation du niveau de la mer

Erosion côtière

Quantification

ans

- Altimétrie satellitaire (pb : zone de delta avec de fortes contaminations terrestres)
- GPS + Marégraphes

IGN

Séparation des contributions

- Elévation relative du niveau de la mer / Subsidence
- Contribution stérique (mer)
- Fonte des glaciers himalayens (mer)
- Sédimentation (subsidence)
- Tectonique ?

Elévation absolue du niveau des mers

Projection à 50

- Méthodes de reconstruction par combinaison modèles actuels et futurs / données actuelles

- Action avec géographes et sociologues Bangladeshis

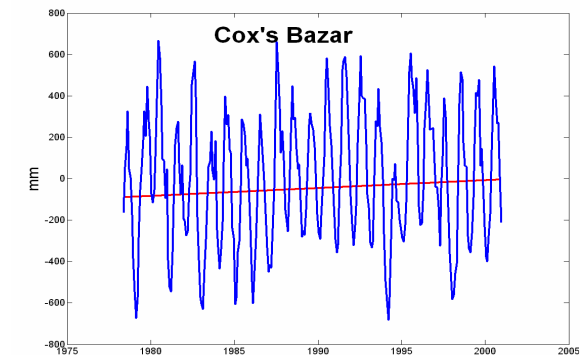
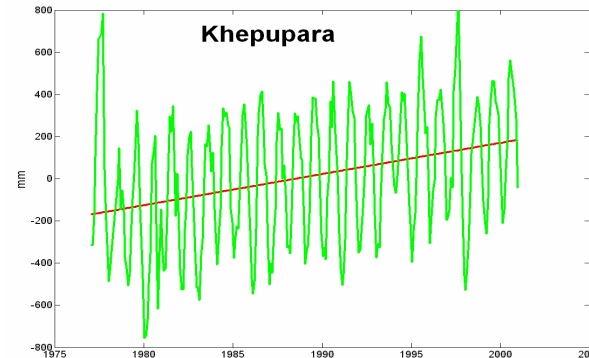
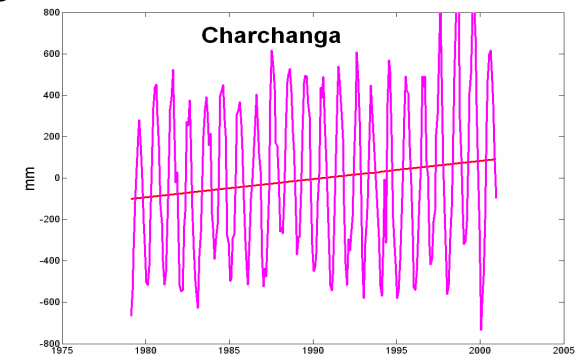
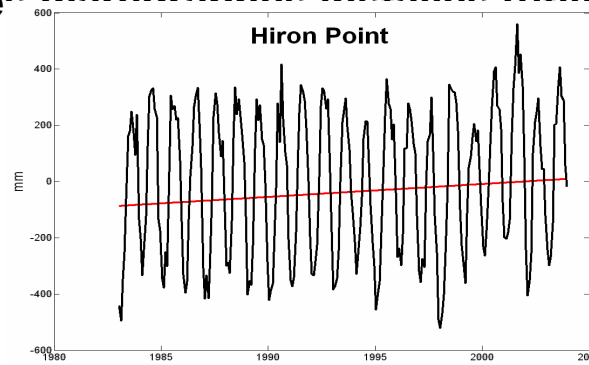
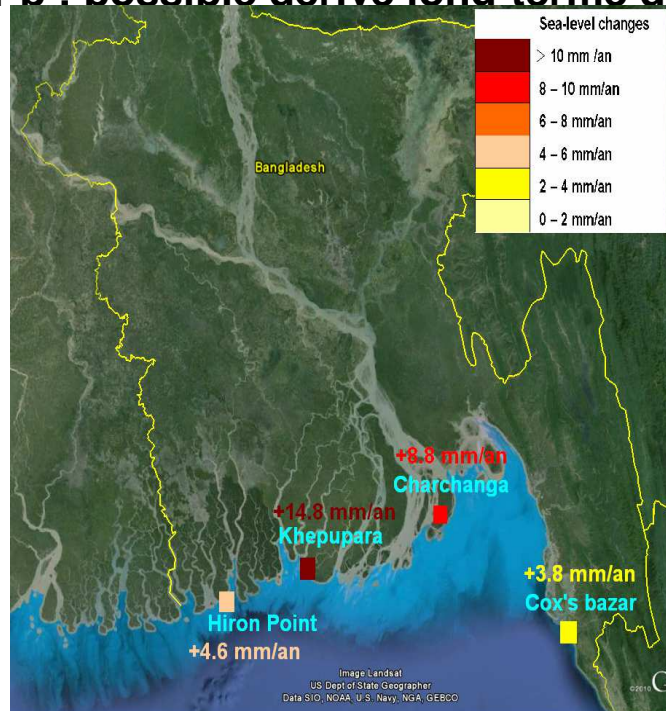
Contexte

niveau de la mer

Enjeux scientifiques :

1- Quelle est la valeur actuelle d'élévation du niveau de la mer ?

Pb : possible dérive long-terme des marégraphes installés (utilisés pour marée)



Installation de nouveaux marégraphes radars en colocalisation avec GPS et anciens marégraphes (pour quantifier s'il y a dérive)

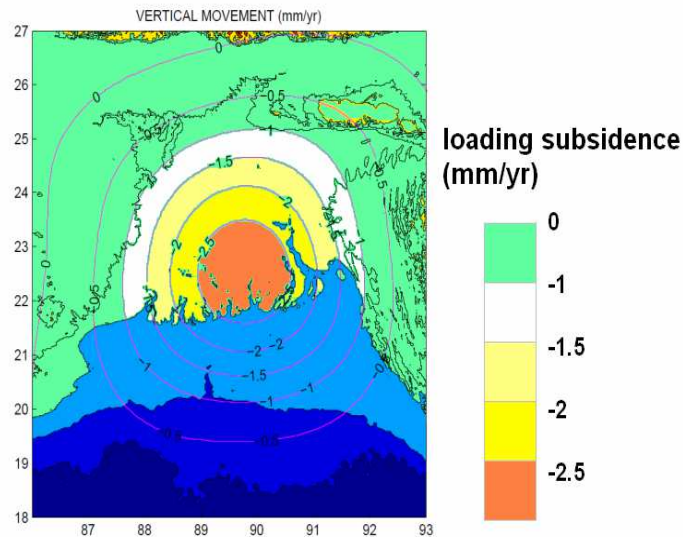
Contexte

2- Cartographie des mouvements verticaux

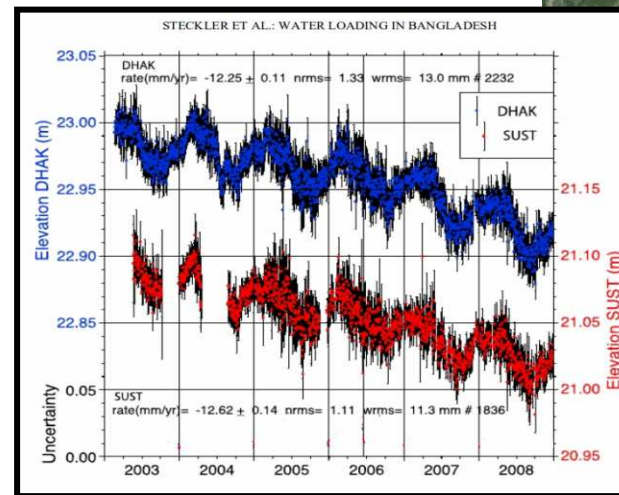
Le delta Gange/Brahmapoutre/Meghna est soumis à une forte subsidence (jusqu'à 1.5 cm/an), dont l'origine (sédimentation, tectonique) reste à confirmer.



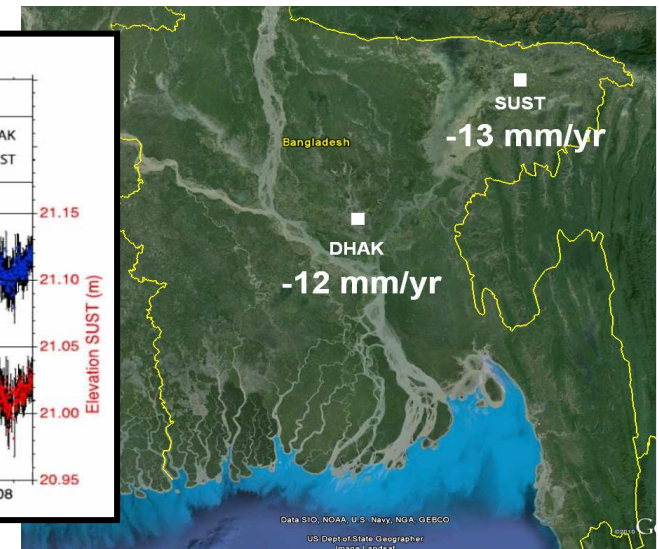
Installation de GPS sur la côte pour quantifier ces mouvements verticaux



@ Karpyshev, 2014



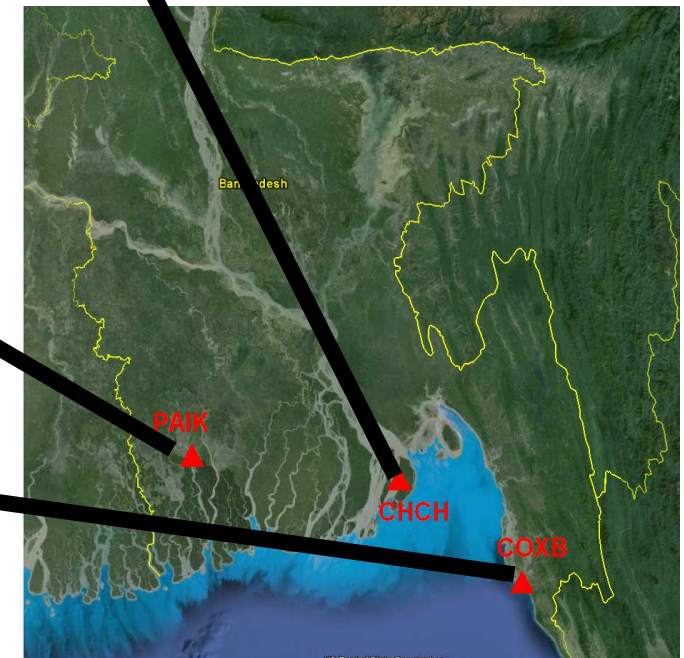
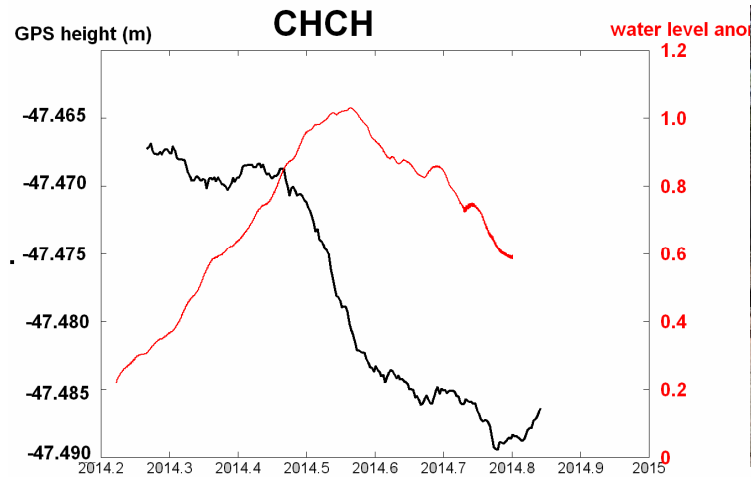
@ Stecker et al. 2010



L'aléa côtier dépend largement des mouvements verticaux séculaires (sédimentation, tectonique ?) / annuels (charge hydrologique liée à la mousson) / inter-annuels (Oscillation Australe)

Instrumentation

3 sites GPS (LeicaGR25) /
Marégraphes radars OTT DuoSens
colocalisés (PAIK, CHCH, COXB)



Réflectométrie GNSS

Problème pratique :

difficile de trouver des sites adéquats pour installer un marégraphe radar (zone de marnage importante) qui doit surplomber eau à tt instant.



Shelter in case of storm : ideal place for a GPS

low tide limit
(approximative)

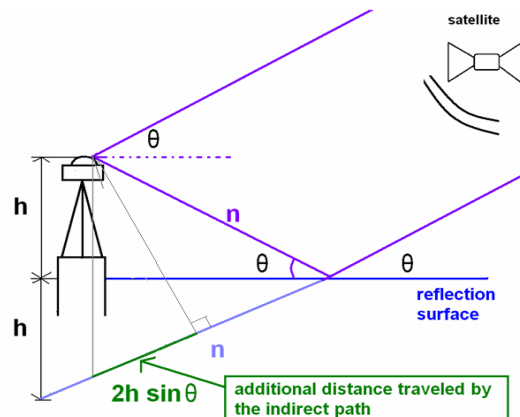
high tide limit



concrete basement, where it is not possible to install radar gauge, but where a GPS could overlook the sea whenever it is high enough

Bangladesh coast, 200 m from CHCH (at middle tide)

Idée : essayer d'utiliser le GPS comme un marégraphe, en analysant les multitrajets.



Larson et al. (2011) : utilisation du **SNR** (Rapport signal sur Bruit) enregistré pour estimer les variations de hauteur d'eau / de hauteur de neige / de contenu en eau du sol.

Réflexométrie GNSS

- SNR enregistré maintenant sur tous les récepteurs récents (GPS , Glonass)
- **Avantage** : toute station GPS est un marégraphe en puissance si elle est bien positionnée

$$SNR = \frac{S}{B}$$

Amplitude du signal reçu pour un satellite i

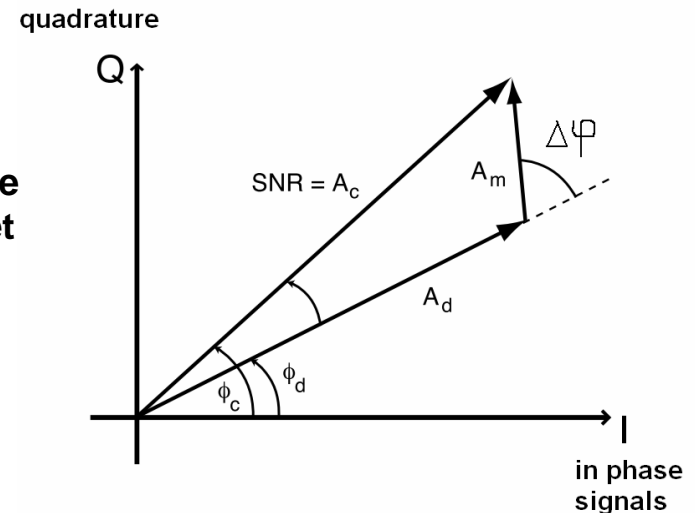
Bruit (environnemental, variations temporelles $\ll S$ pour une station permanente)

$$B.SNR = S = S_d + S_m = \sqrt{A_d^2 + A_m^2 + 2A_d A_m \cos(\Delta\varphi)}$$

Amplitude du signal « direct »

Amplitude du signal « réfléchi »

Déphasage entre signaux direct et réfléchi



Hypothèse principale :

Les variations de A_d et de A_m correspondent aux variations « lentes » et la tendance dans les séries temporelles de SNR.

Les variations de $\Delta\varphi$ correspondent aux oscillations « rapides » du SNR

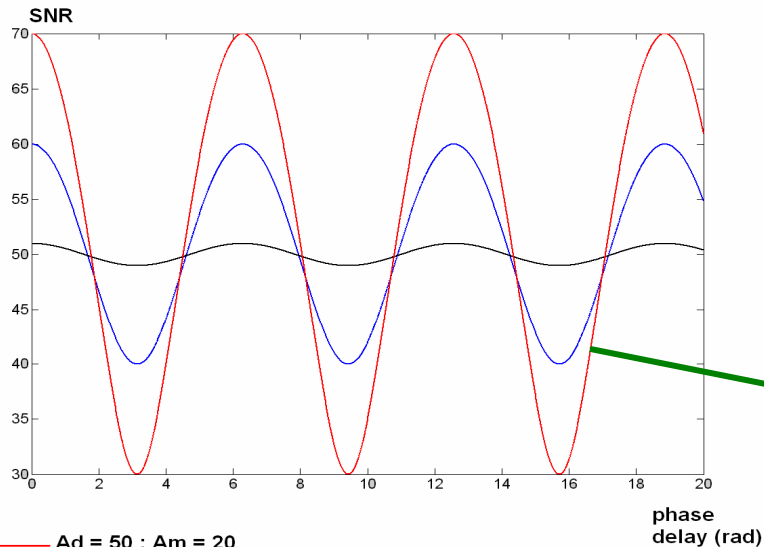
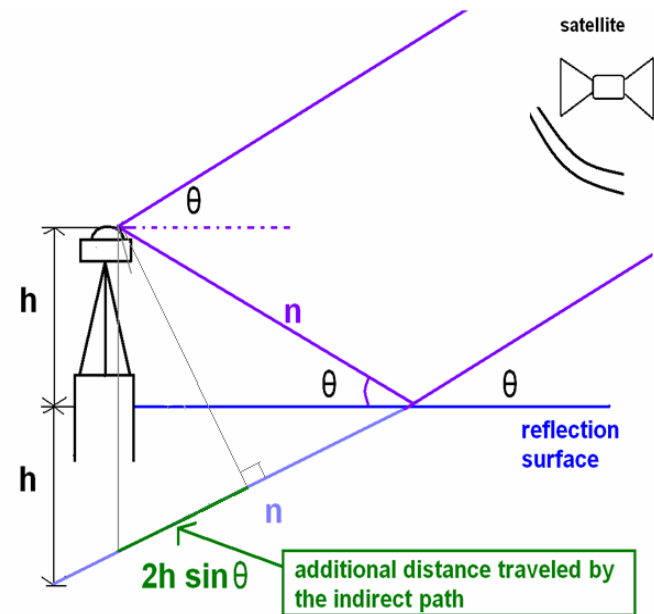
Réflexométrie GNSS

Ad = amplitude du signal « direct ». Variations temporelles « lentes » principalement associées aux cycles de passage du satellite i

Am = amplitude du signal « multitrajets ». Variations temporelles « lentes » principalement associées à la réflectivité de la surface et à l'élévation du satellite

$\Delta\phi$ = déphasage correspondant à l'excès de trajet n réalisé par le signal réfléchi

$$\Delta\phi = \frac{4\pi h \sin(\theta)}{\lambda}$$



— Ad = 50 ; Am = 20

— Ad=50; Am=10

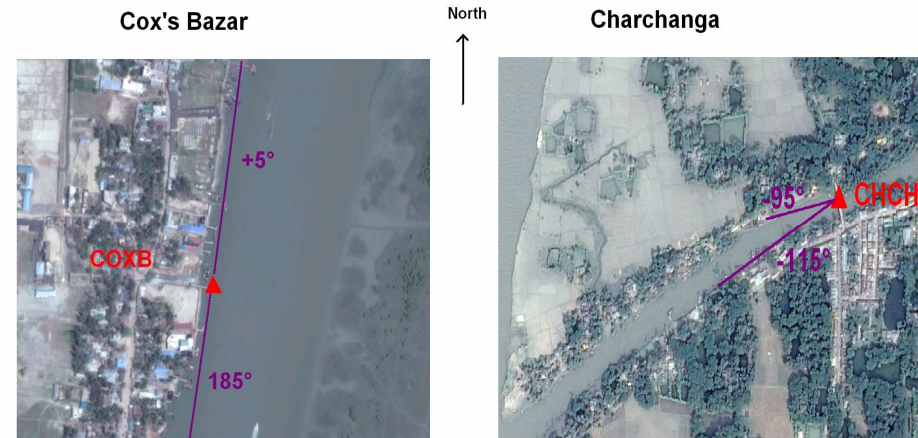
— Ad=50; Am=1

Si Ad et Am = constantes (et $Ad \gg Am > 0$), $\Delta SNR(t)$ est soumis à des oscillations de même période que $\cos(\Delta\phi)$

Fréquence des oscillations directement proportionnelle à h

Réflexométrie GNSS

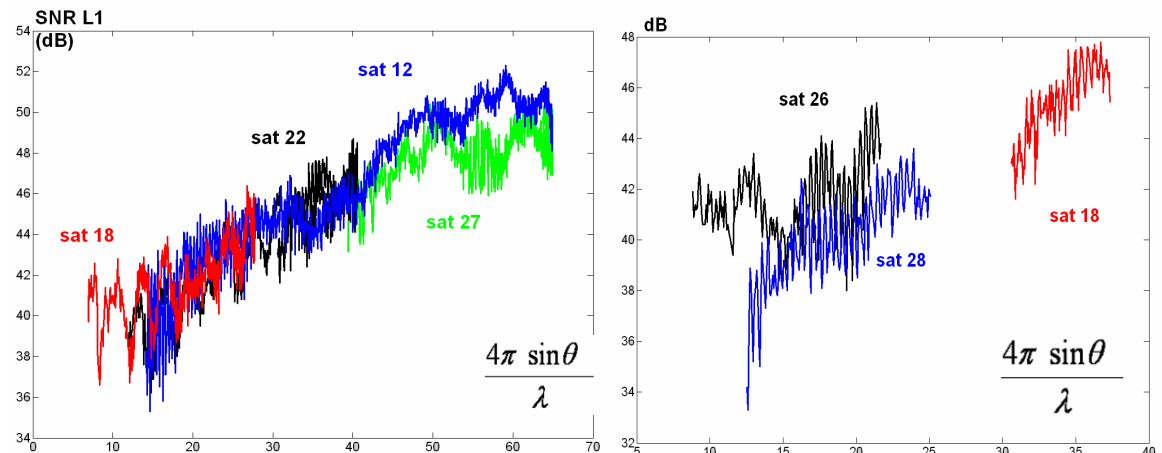
1. Sélection en **azimut** des satellites dont les signaux peuvent a priori se réfléchir sur l'eau
2. Sélection en **élévation** (satellites bas $< 40^\circ$ sont plus affectés par les multitrajets)



3. Extraction du SNR sur les Rinex 1s. Pb : dépendance de SNR en h et en $\sin\theta$

h supposé constant sur la période d'estimation (qui devra donc être la plus courte possible tt en restant suffisante pr avoir assez d'oscillations pour estimer h).

$$\Delta SNR(t) = \Delta SNR\left(\frac{4\pi \sin(\theta(t))}{\lambda}\right)$$



Réflectométrie GNSS : méthodologie

4. Retrait des contributions de Ad et Am par un polynôme sur la période d'estimation

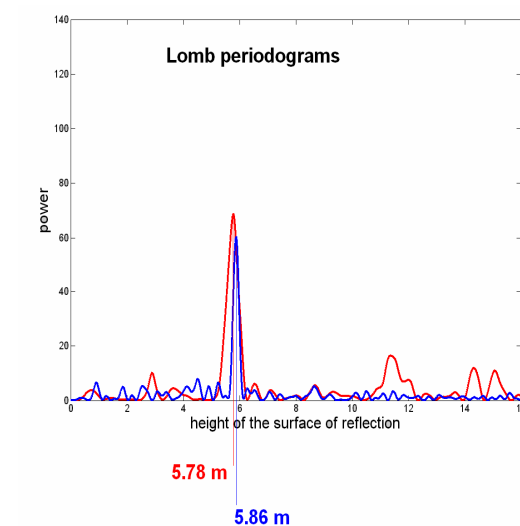
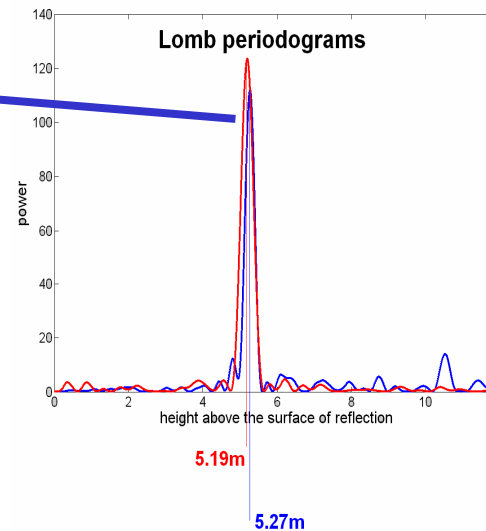
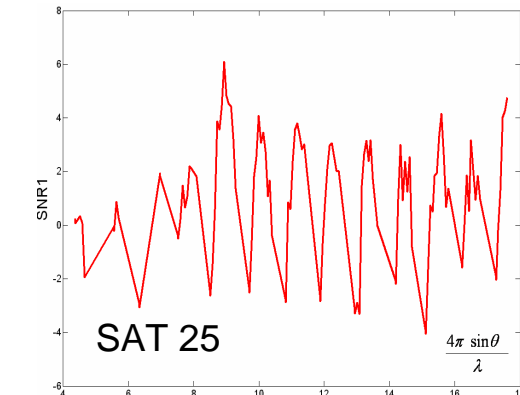
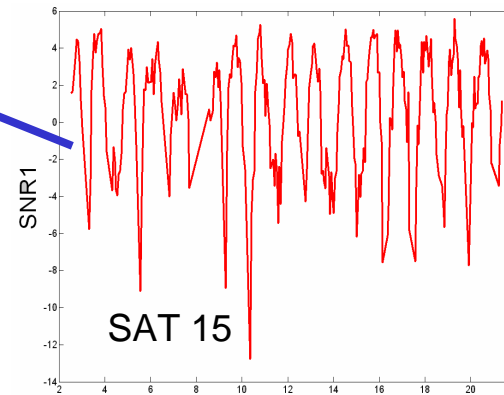
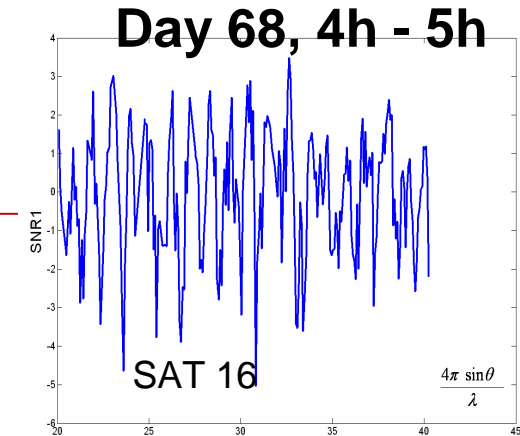
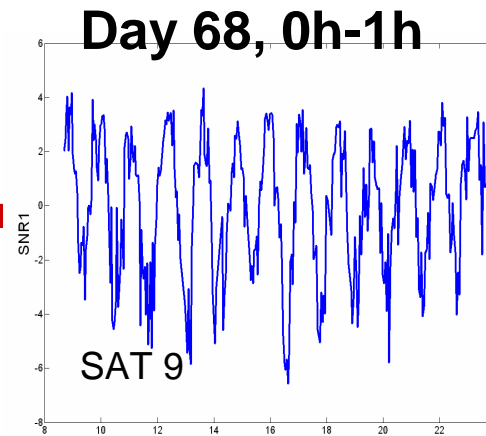
5. Extraction de la fréquence

principale F de $\Delta SNR(\frac{4\pi \sin(\theta(t))}{\lambda})$

$$h = 2\pi F$$

6. Moyenne pondérée des satellites sur L1 et L2 en fonction:

- Du nombre de mesures SNR disponibles
- De la puissance spectrale de F

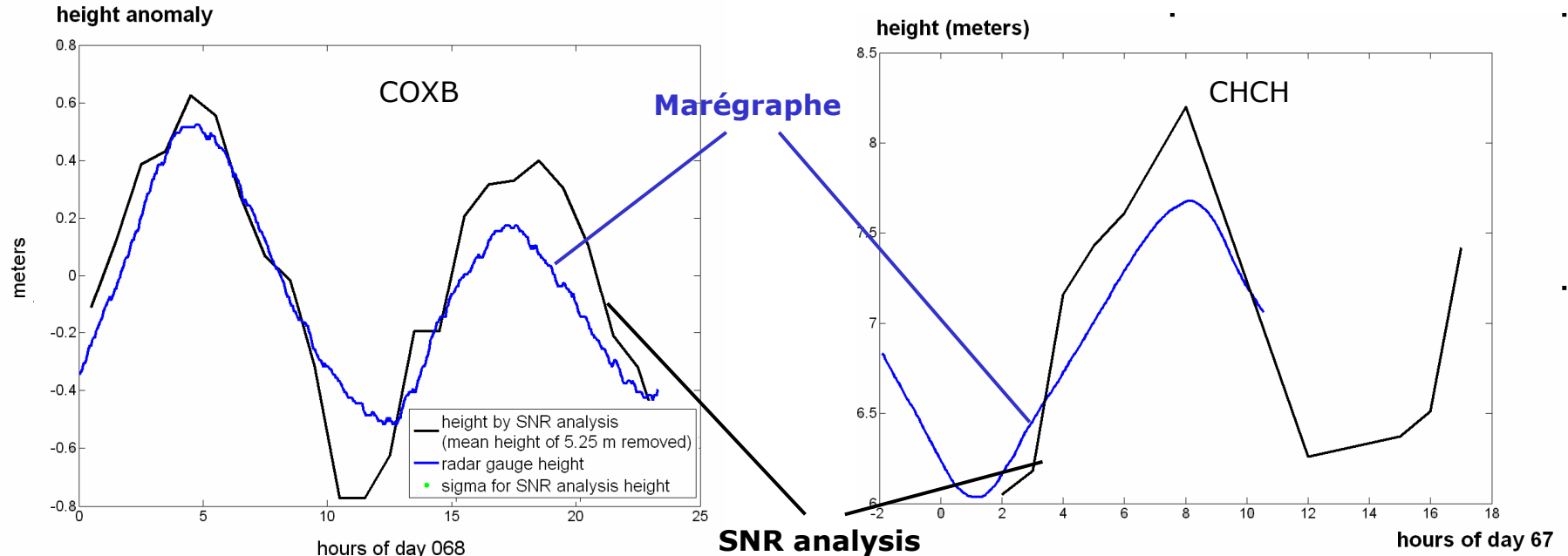


Réflexométrie GNSS : premiers résultats

Autres paramètres principaux:

- La période d'estimation (dépend de h et du marnage): **1h à Cox Bazar, 15 minutes à Brest**
- L'élimination des hauteurs non-réalistes: **2 estimations**, destinées à fixer les variations de hauteur (Zmin, Zmax, période) puis à les raffiner
- Correction de l'angle d'incidence liée à la traversée de la troposphère (flexion) en fonction de l'élévation (Roussel, 2014)

résultats

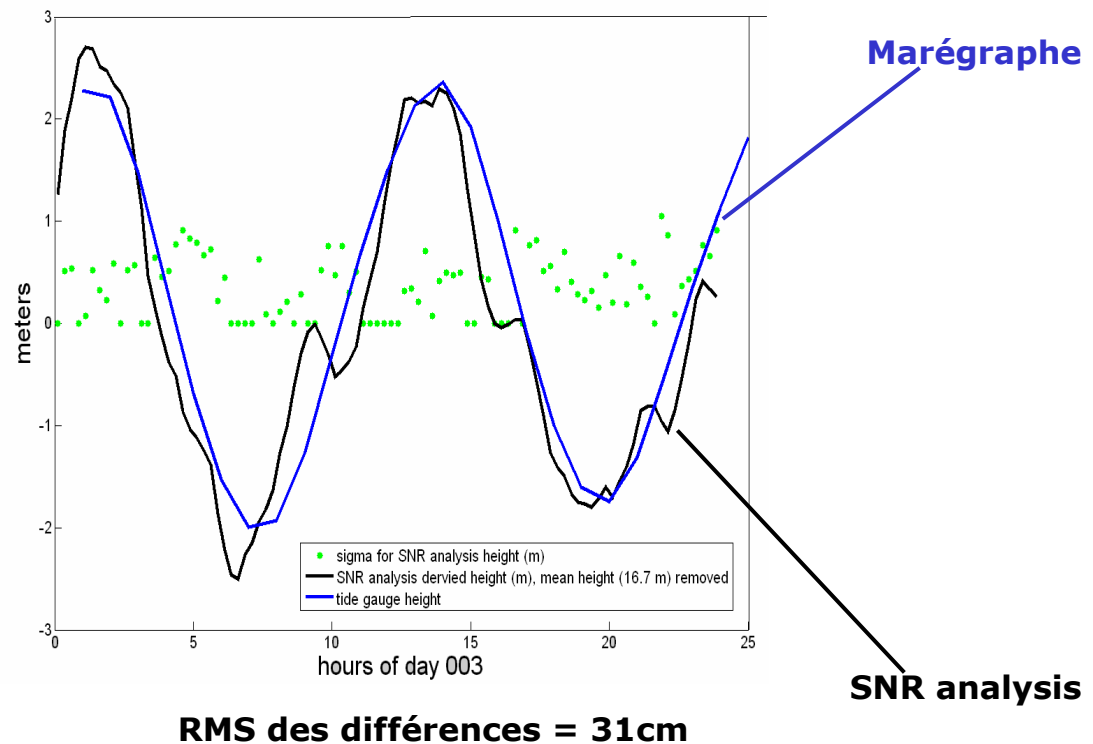
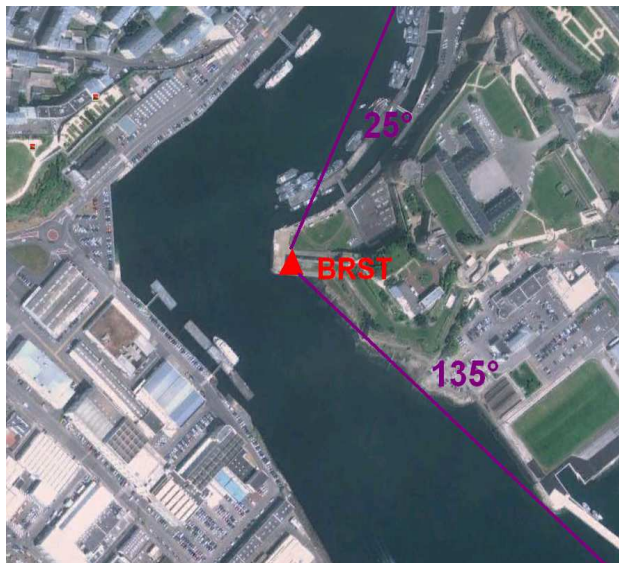


RMS des différences = 18cm

Résultats (BRST)

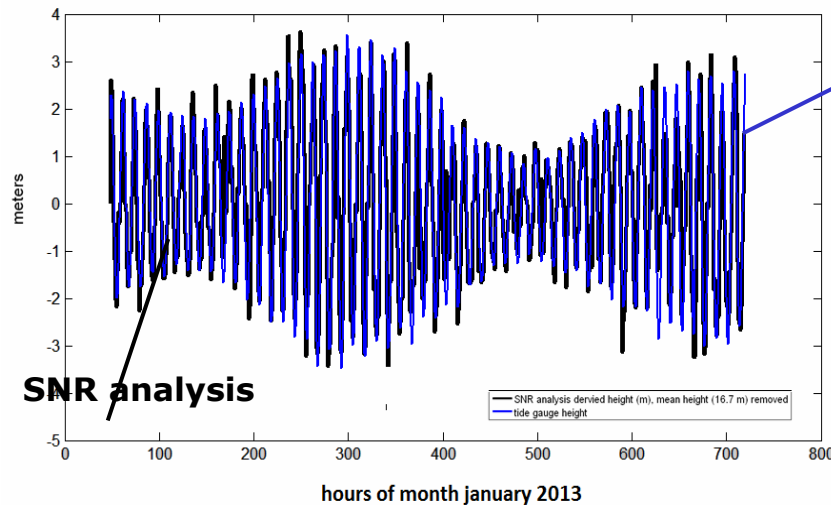
Manque de données au Bangladesh → Tests sur la station de Brest

Avantages : - SNR disponibles depuis mi-2007 sans interruption (avec néanmoins 2 changements d'antenne)
- Environnement correct + station élevée (+ de 10m) - Station utilisée par Lofgren (2014) avec une méthode légèrement différente



Résultats (BRST)

1 mois de données Rinx à 1 s analysées, h estimé ttes les 15 minutes



Marégraphe

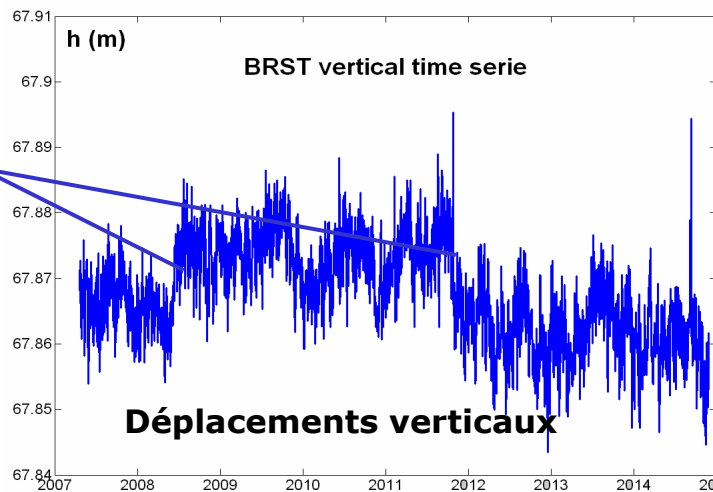
RMS des différences = 48 cm, <10% marnage

Correlation : 0.89

SNR analysis

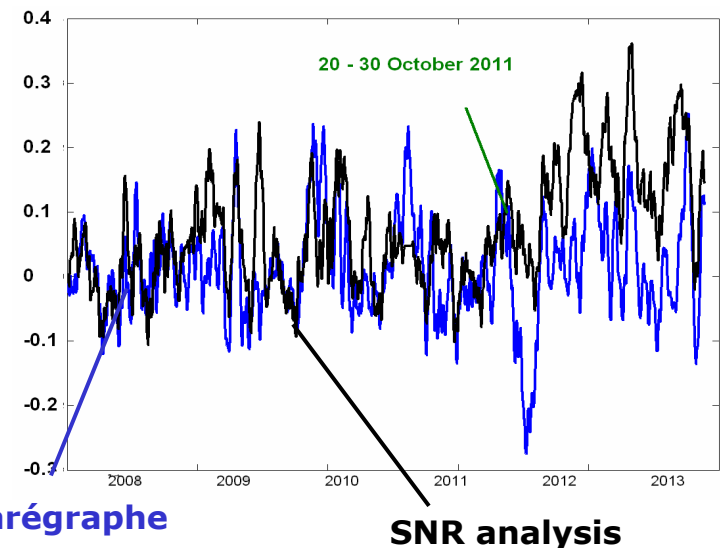
7 ans de données SNR analysées

+ correction des discontinuités liées aux changements d'antenne (1.1 cm juin 2008, 0.8 cm octobre 2011):



- Moyenne hebdomadaire

Saut au moment du changement de matériel en Octobre 2011



Marégraphe

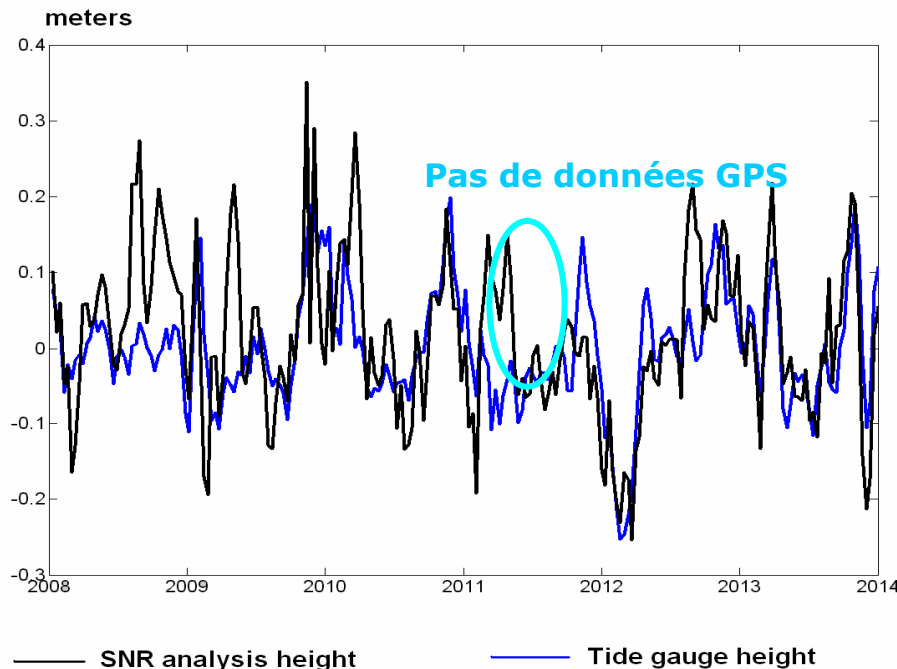
SNR analysis

Résultats (BRST)

Après correction du saut en 10/2011

Corrélation moyenne : 0.65 (0.82 après 10/2011)

RMS des différences : 7.3 cm (4.8 cm après 10/2011)

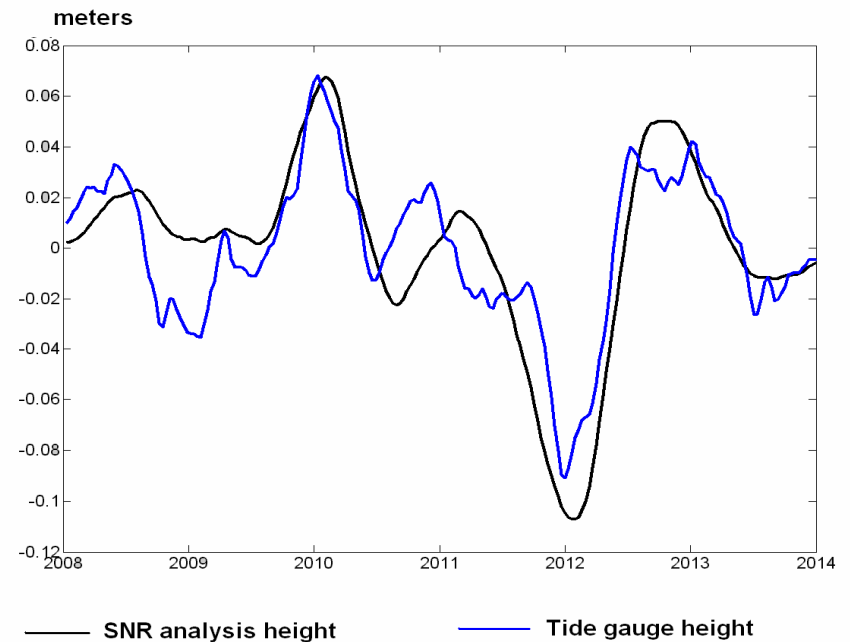


Signal inter-annuel (après retrait annuel + filtrage hautes fréquences)

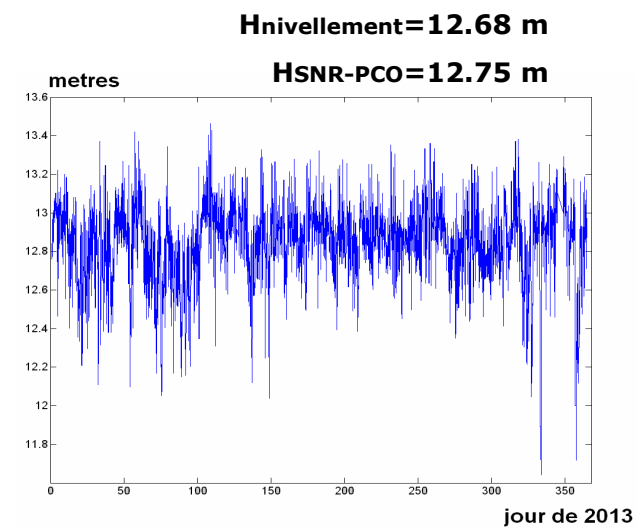
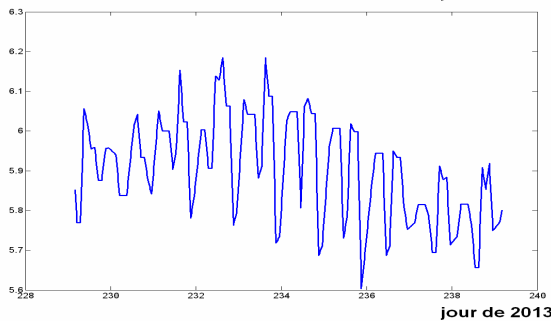
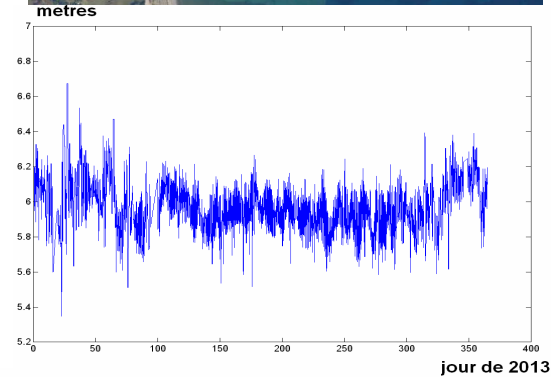
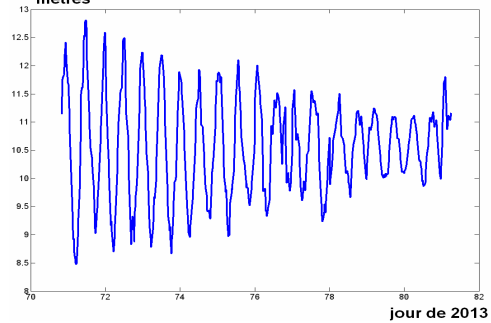
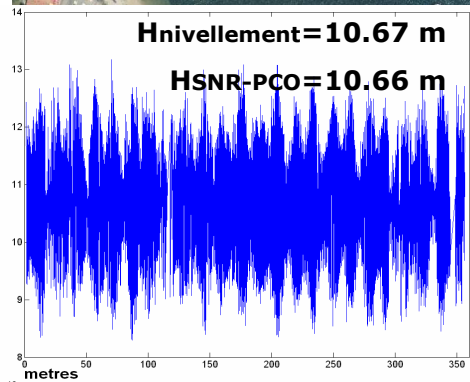
Corrélation moyenne : 0.81

- Pas de dérive inter-annuelle du SNR

- Evènements marquants communs (hiver 2010, hiver 2012)



Résultats (suite)



Résultats : bilan

- Résultats cohérents avec ceux de Larson (2011) et Lofgren (2014) malgré qqes nuances dans le traitement
- Résultats « nouveaux » : intérêt de la réflectométrie SNR pour les variations hebdomadaires/ mensuelles/ annuelles/ inter-annuelles de hauteur de mer
- Réflectométrie permet de contrôler les données des marégraphes, mais pas encore d'extraire des tendances cohérentes pour l'étude des variations de niveau des mers. Mais ce n'est qu'une question de temps.
- Analyse SNR dépend de la qualité des enregistrements (cf BREST après 2011).
- Comment expliquer le biais associé au changement de matériel ?

Perspectives

- Vers un GPS « 2 en 1 » à terme si des tendances cohérentes GPS/marégraphes peuvent être extraites ? Probable vu l'accord qui va en s'améliorant
- Application possible à un grand nombre de stations (hauteur de mer, de lacs, de neige).
- Prise en compte de ce facteur dans les choix d'installation de sites
- Amélioration de la stratégie de traitement (contraintes, fréquences variables)