

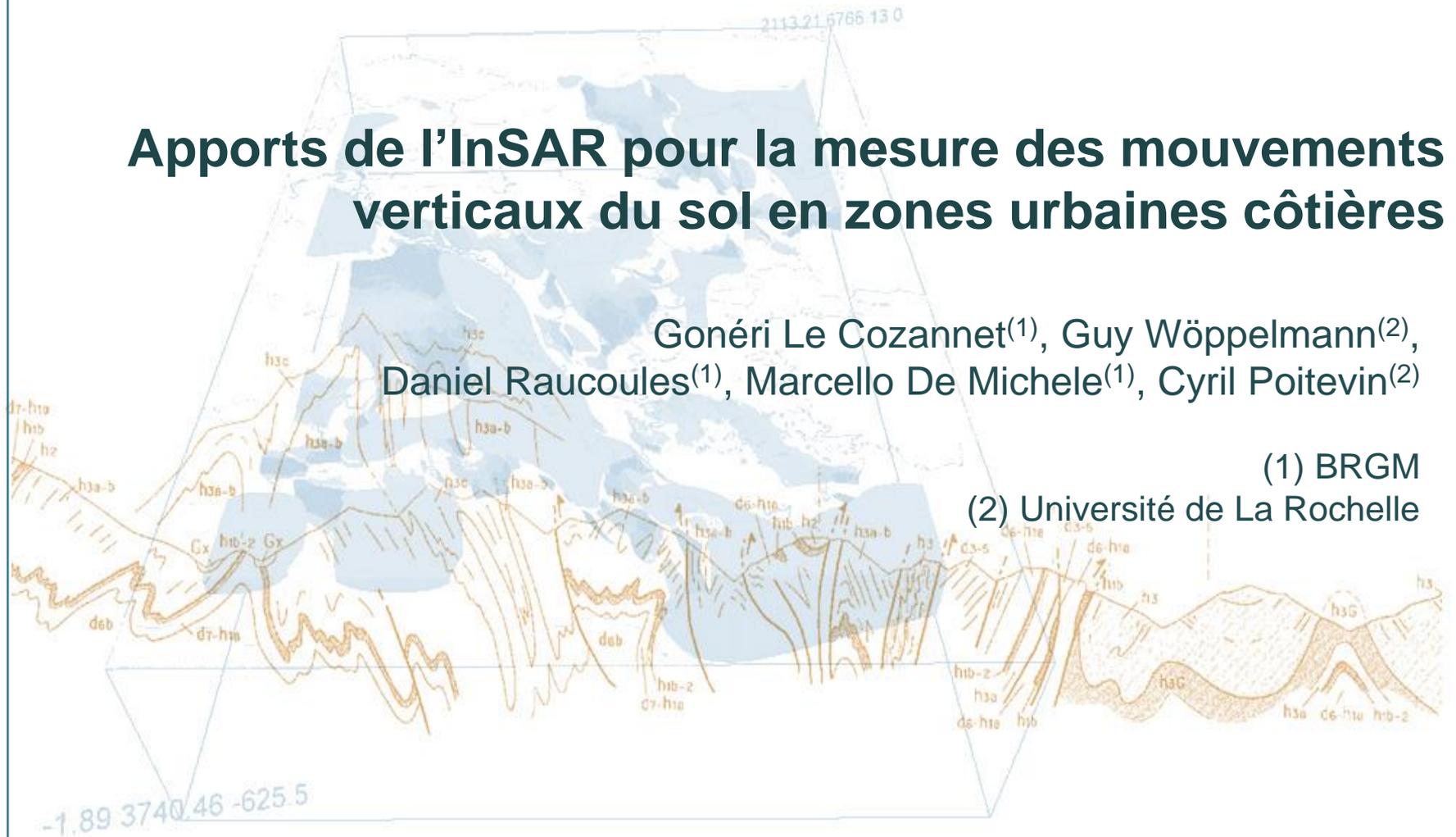


Apports de l'InSAR pour la mesure des mouvements verticaux du sol en zones urbaines côtières

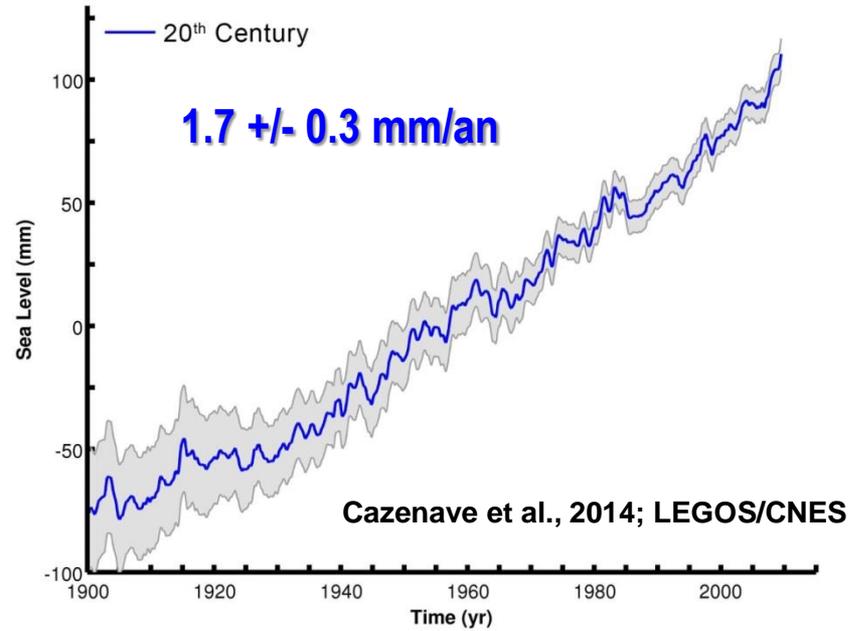
Gonéri Le Cozannet⁽¹⁾, Guy Wöppelmann⁽²⁾,
Daniel Raucoules⁽¹⁾, Marcello De Michele⁽¹⁾, Cyril Poitevin⁽²⁾

(1) BRGM

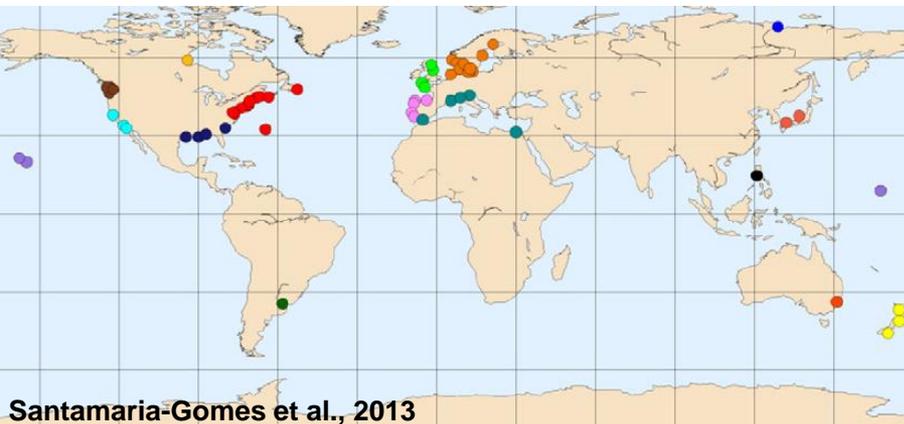
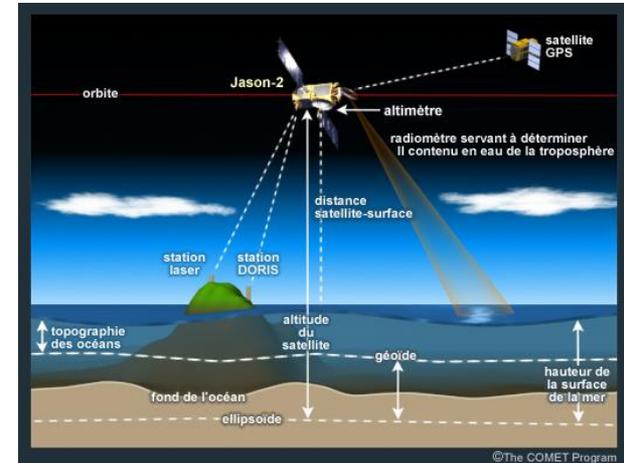
(2) Université de La Rochelle



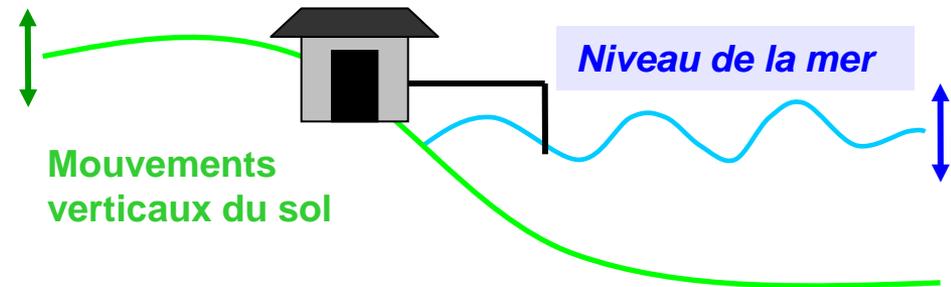
Variations du niveau de la mer global



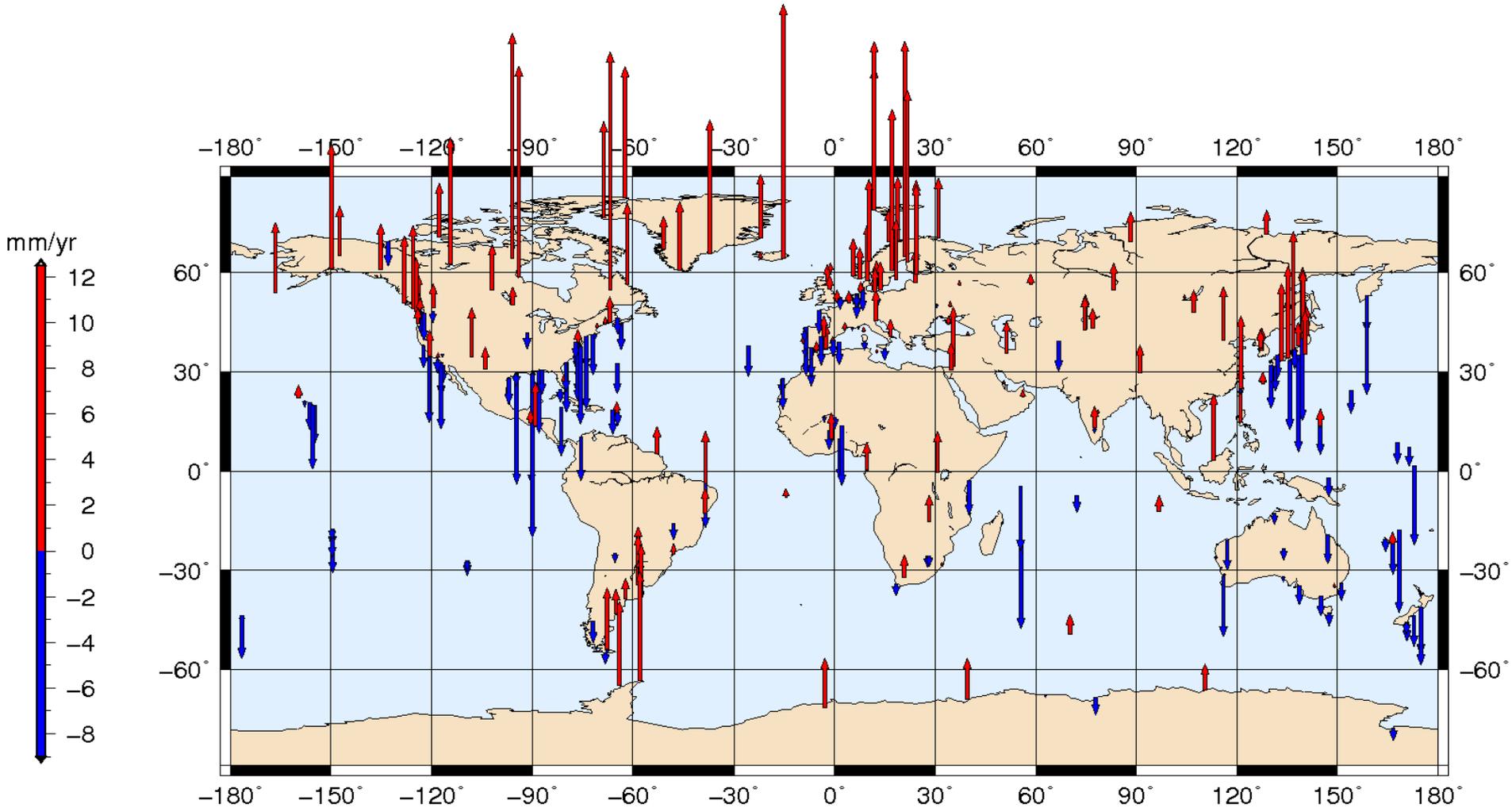
20 dernières années:
altimétrie spatiale



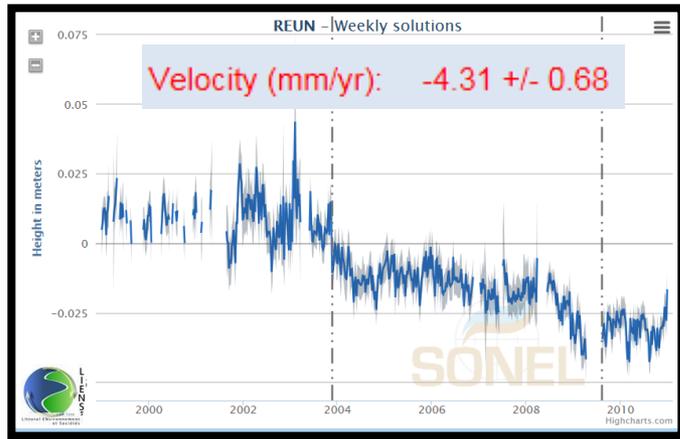
marégraphe



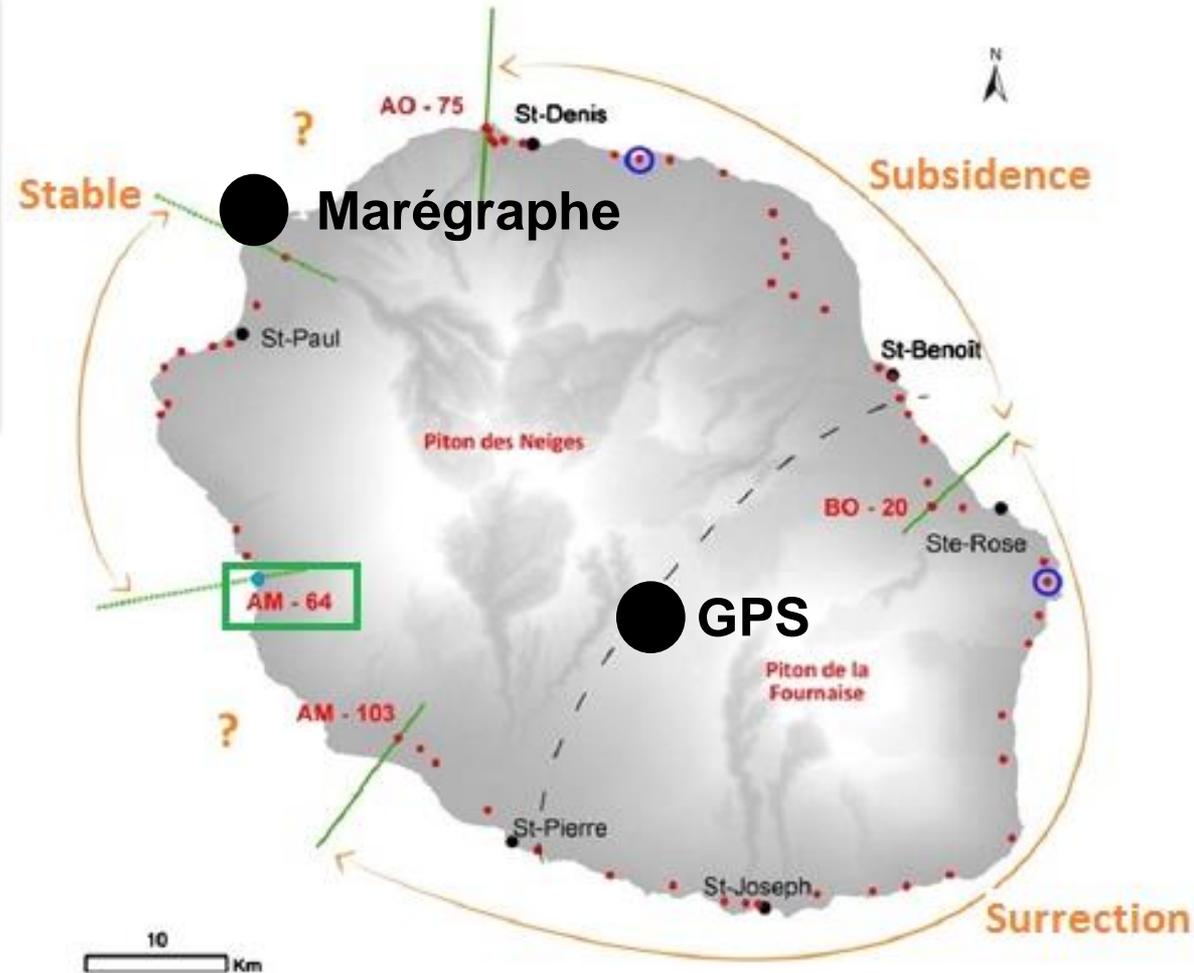
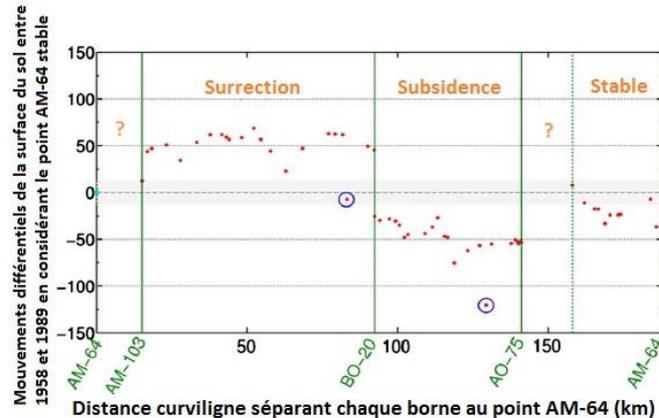
Les marégraphes peuvent être affectés par des mouvements verticaux du sol s'exerçant à l'échelle **locale**



Les GPS sont rarement situés exactement sur le marégraphe: exemple à La Réunion



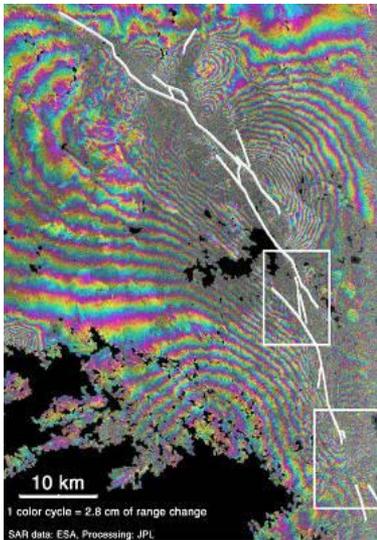
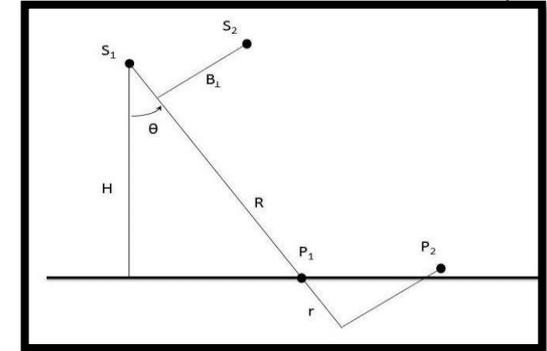
www.sonel.org



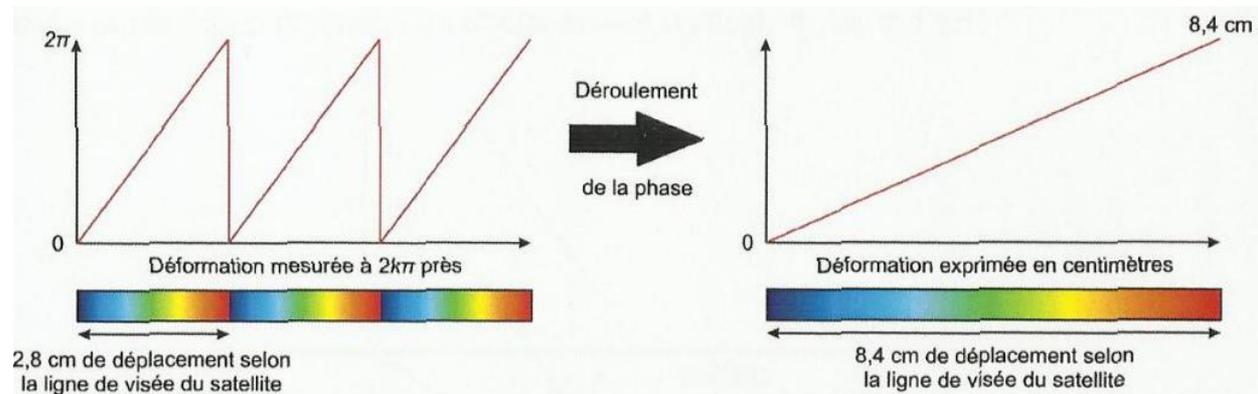
Principe de l'interférométrie radar



- Interférométrie radar: basée sur la combinaison de 2 images radar . Elle permet soit d'extraire la topographie locale soit de détecter et quantifier la déformation du sol ayant eu lieu entre deux acquisitions d'images SAR.
- différence de phase entre deux images coréregistrées (interférogramme)



$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$$

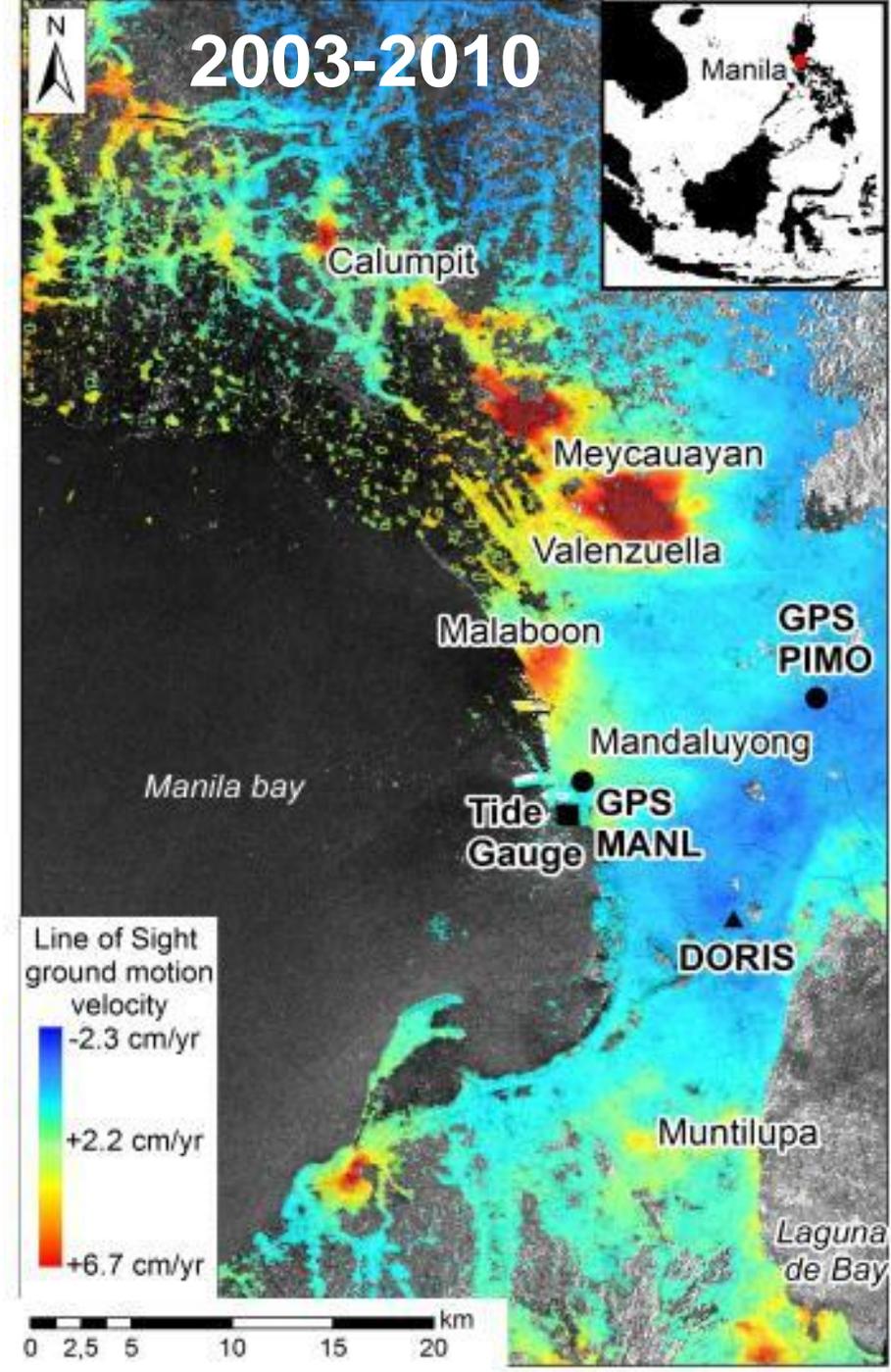
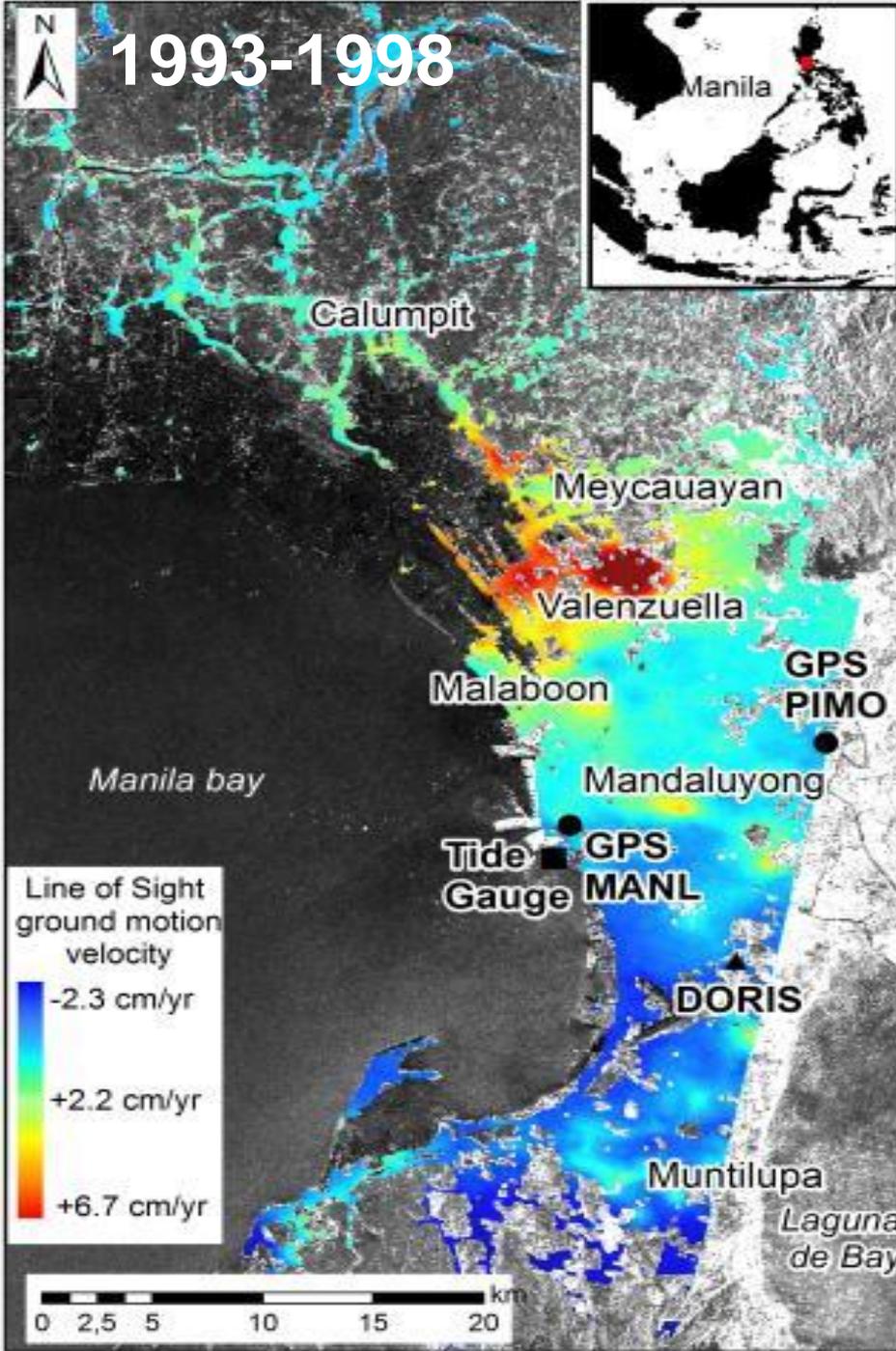


$$\Phi = \phi_{topo} + \phi_{mvt} + \phi_{atmos} + \phi_{orbital} + \phi_{ellips} + \text{bruit}$$

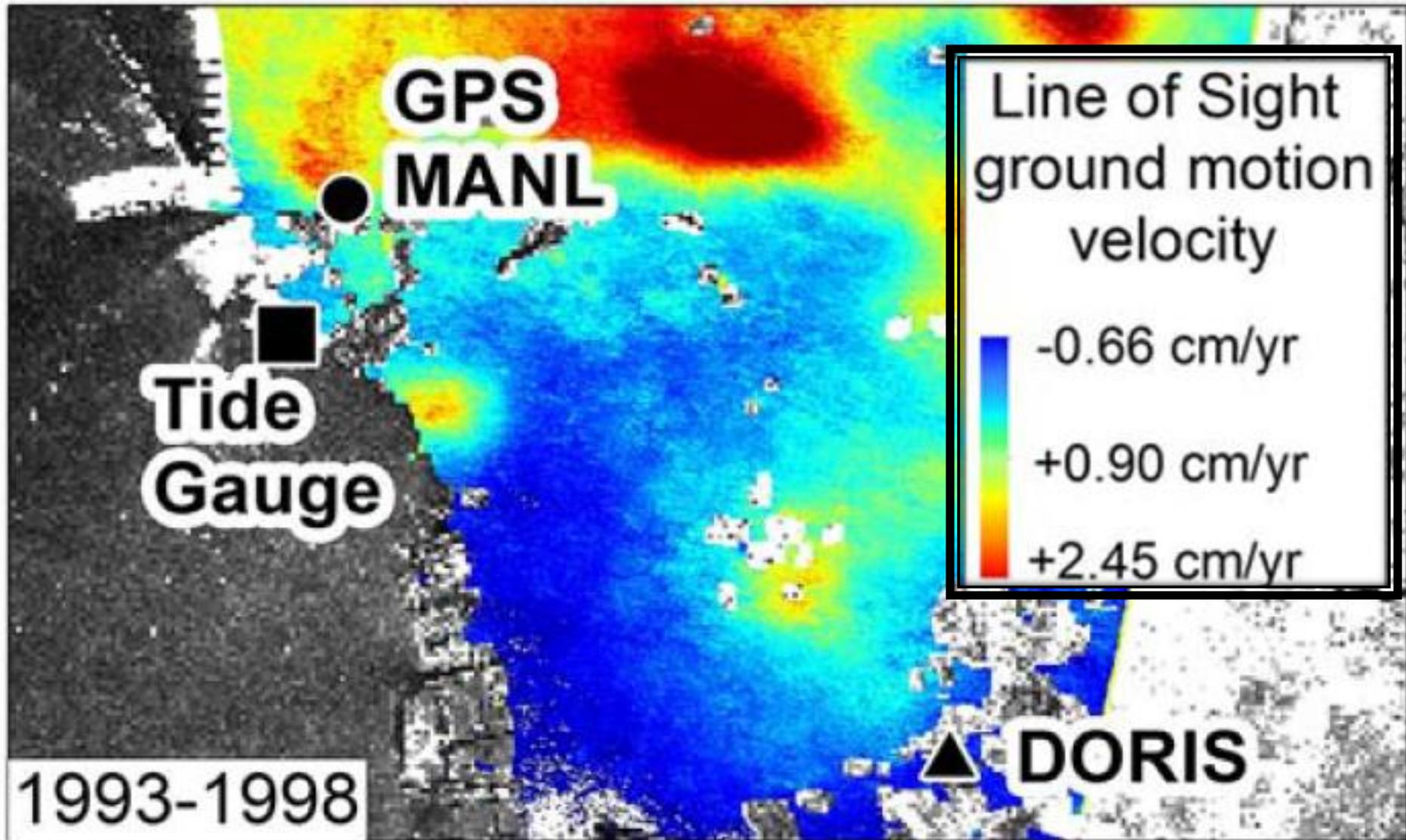
Chaîne de traitement utilisée: GAMMA

L'InSAR peut-il contribuer à mieux caractériser les mouvements verticaux du sol dans le voisinage d'un marégraphe?

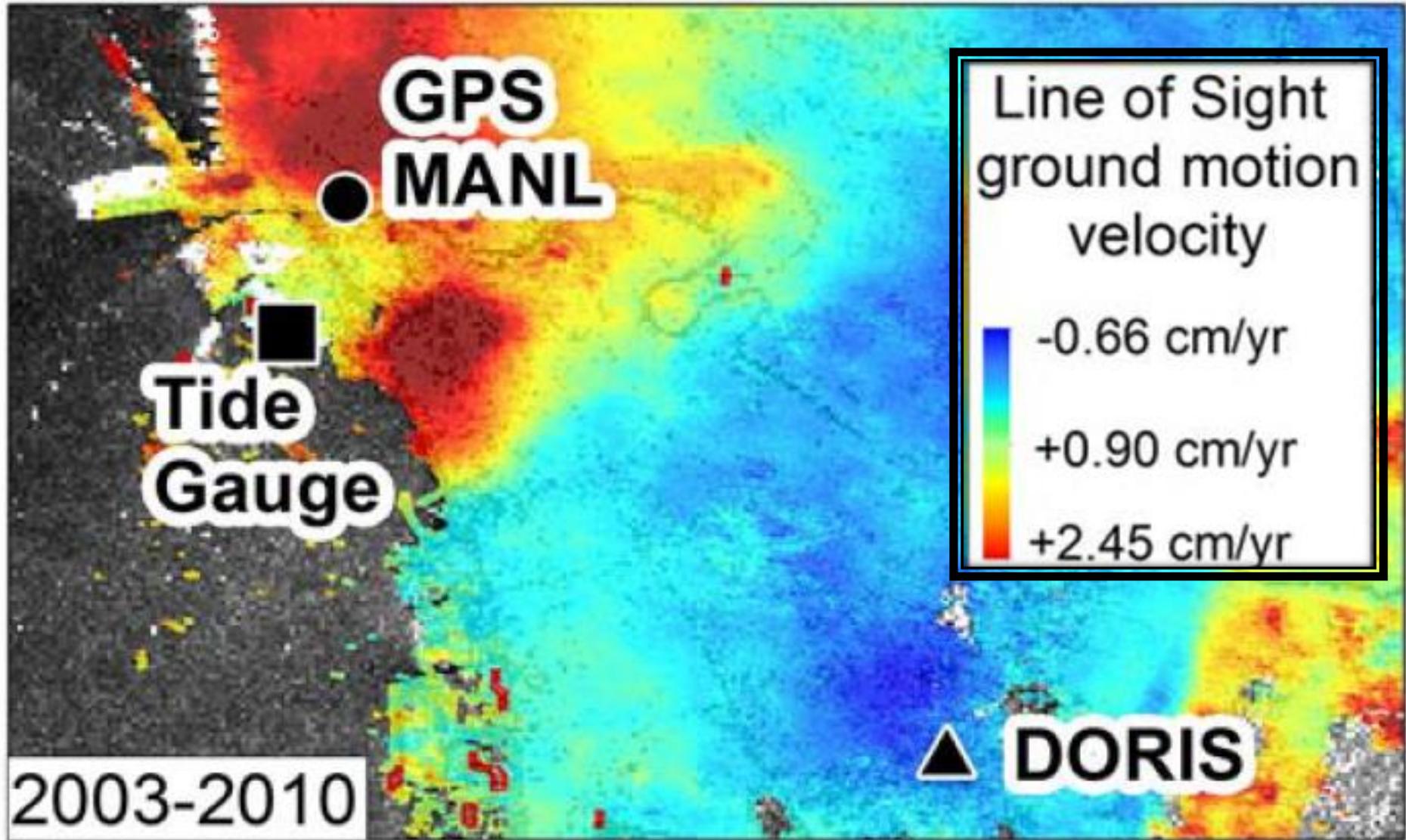




Même le GPS situé à 1,7 km du marégraphe n'est pas représentatif des mouvements verticaux du marégraphe

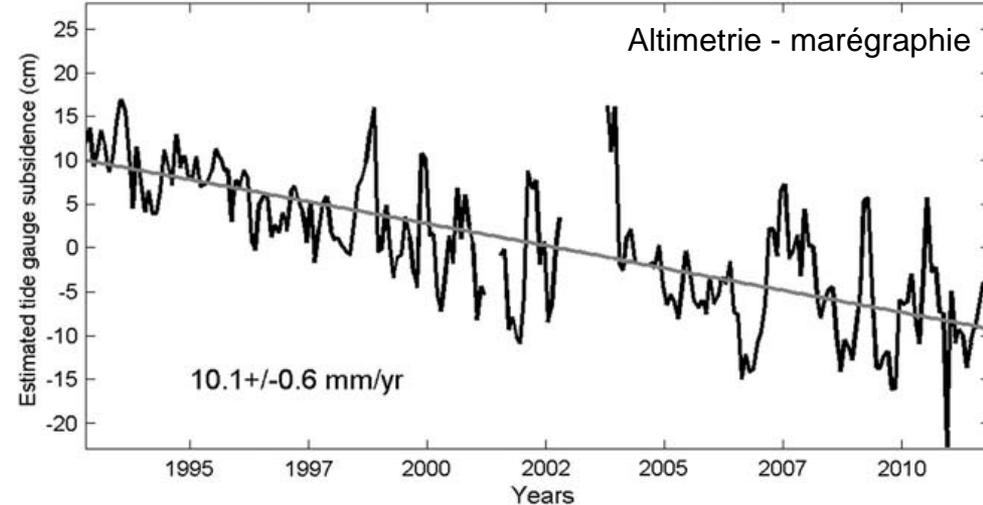
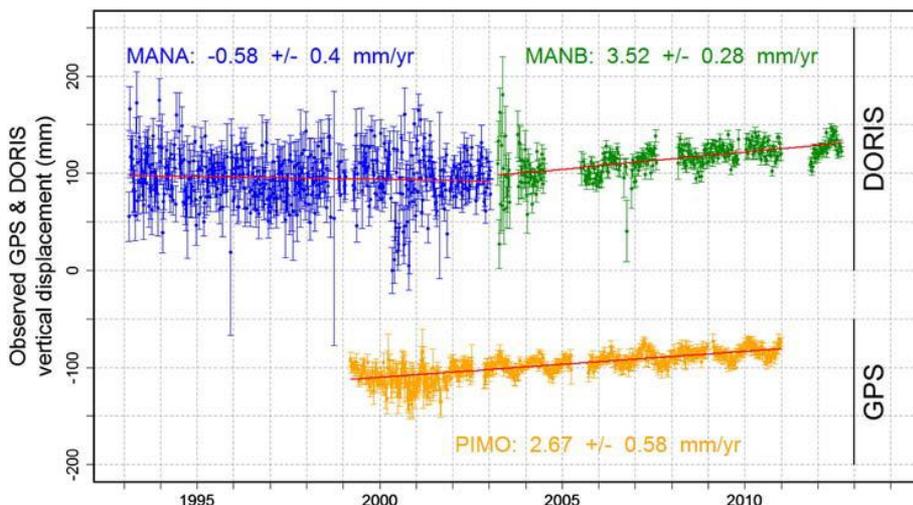
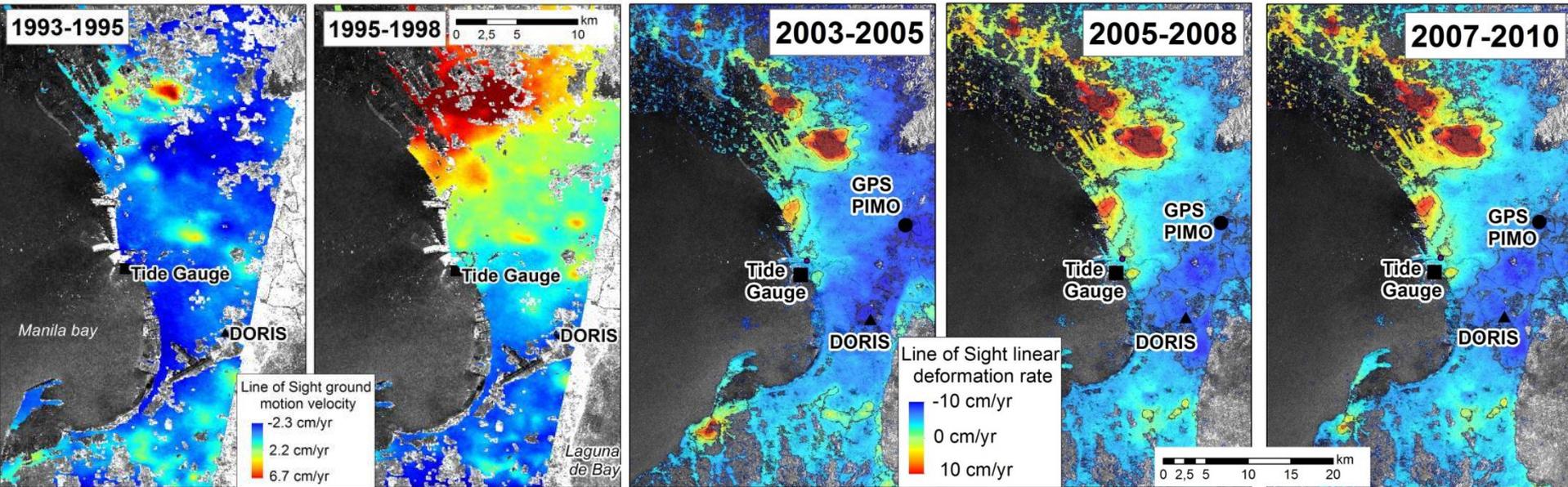


Les extractions d'eaux souterraines semblent s'accélérer dans le voisinage du marégraphe



Les extractions d'eaux souterraines causent des mouvements verticaux du sol rapides et non linéaires

Les mesures du marégraphe, des GPS et de la station DORIS sont affectées



L'InSAR peut-il contribuer à mieux caractériser les mouvements verticaux du sol au voisinage d'un marégraphe?

- oui, si les mouvements sont rapides
- Mais dans ce cas, le marégraphe est inutilisable pour l'étude de l'élévation du niveau de la mer

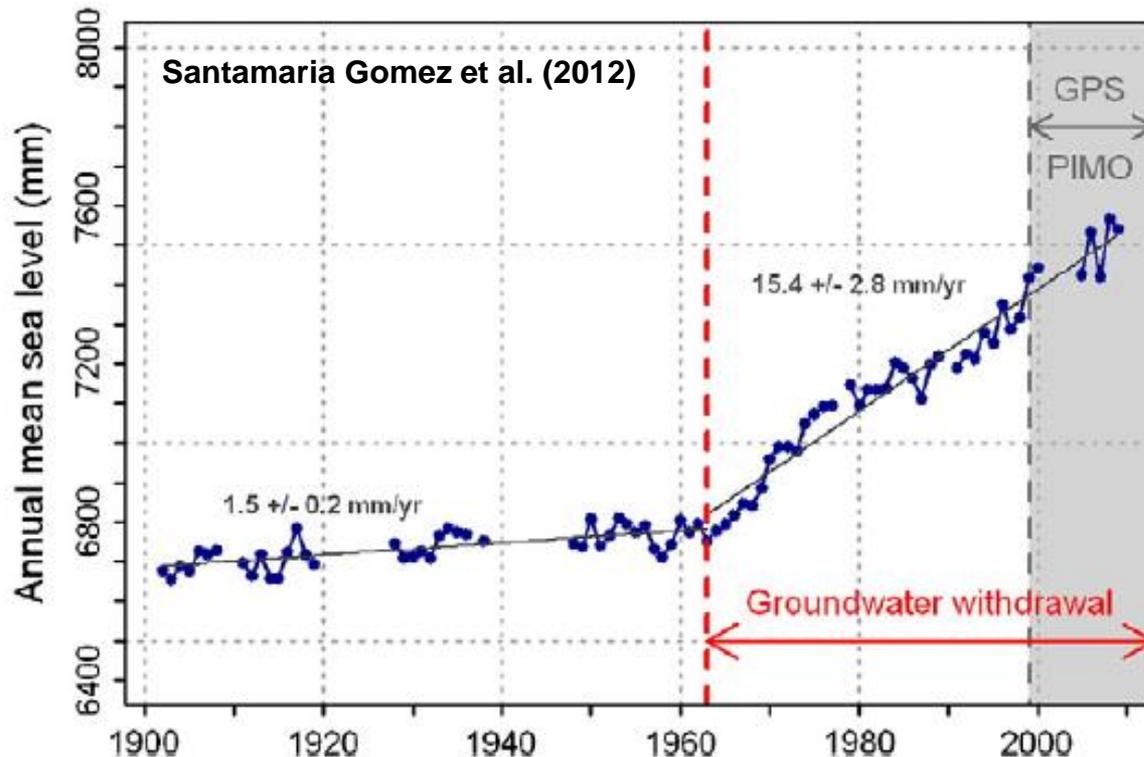


Fig. 5. Tide gauge record at Manila (Filipinas) station, from the PSMSL.

L'enjeu est d'atteindre des niveaux de précision / justesse très inférieurs au millimètre par an, pour qualifier des sites marégraphiques de confiance

Méthode des réflecteurs persistants (PSI)

- identification de points rétrodiffuseurs forts (=PS) et stables dans le temps
- utilisation de l'ensemble des images disponibles (pas de B_{\perp} limite), faible décorrélation temp.
- estimation de la composante atmosphérique (et retrait) pour chaque date; (d, h) pour les PS
 - **Vitesse moyenne + séries temporelles**
 - **30-50 images**
 - **précision: inférieure au mm/an**

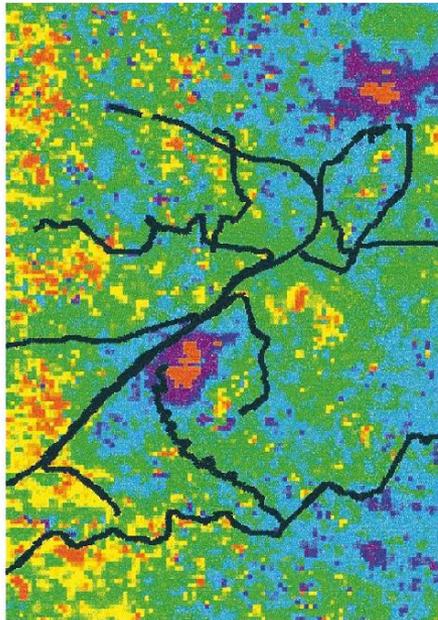
composante	Ecart temporel	Composante perpendiculaire de l'écart orbital B_{\perp}	distance entre deux points de l'image
ϕ_{topo}	décorrélé	proportionalité	corrélation variable suivant le cas
ϕ_{def}	fortement corrélé (sauf cas particuliers)	décorrélé	corrélation variable suivant le cas
ϕ_{atm}	décorrélé	décorrélé	fortement corrélé
ϕ_{orbit}	décorrélé	décorrélé	fortement corrélé
bruit	décorrélé	décorrélé	décorrélés

$$\Phi = \phi_{topo} + \phi_{mvt} + \phi_{atmos} + \phi_{orbital} + \phi_{ellips} + \text{bruit}$$

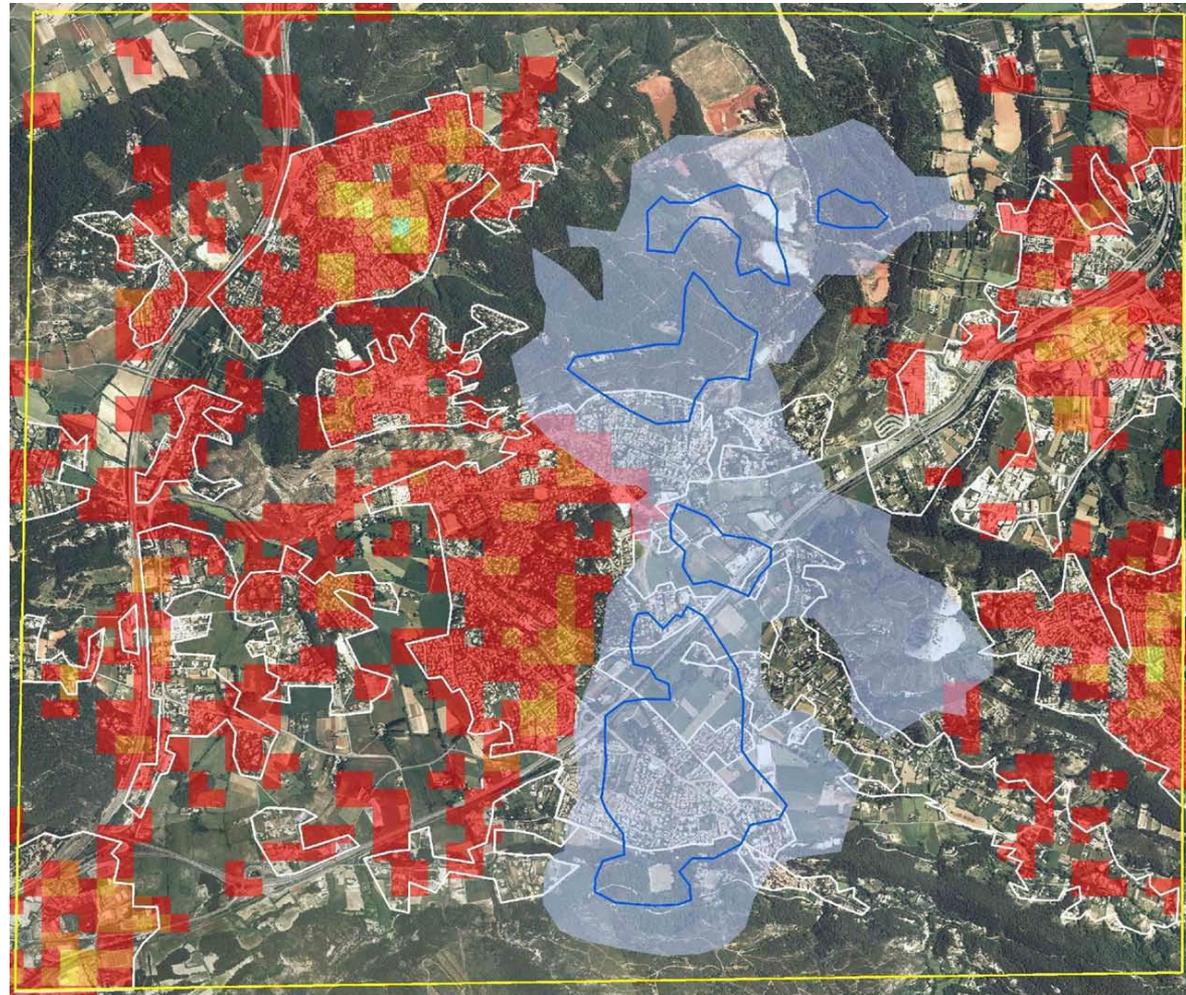
Chaîne de traitement utilisée: GAMMA/IPTA

Précision / justesse des données InSAR (PSIC4)

**PSIC-4
(2005-2009)
« Blind test »**



**1994
Mar-07 / Mar -22**



Points per
10000 m²



Recommandations: 2 étapes:

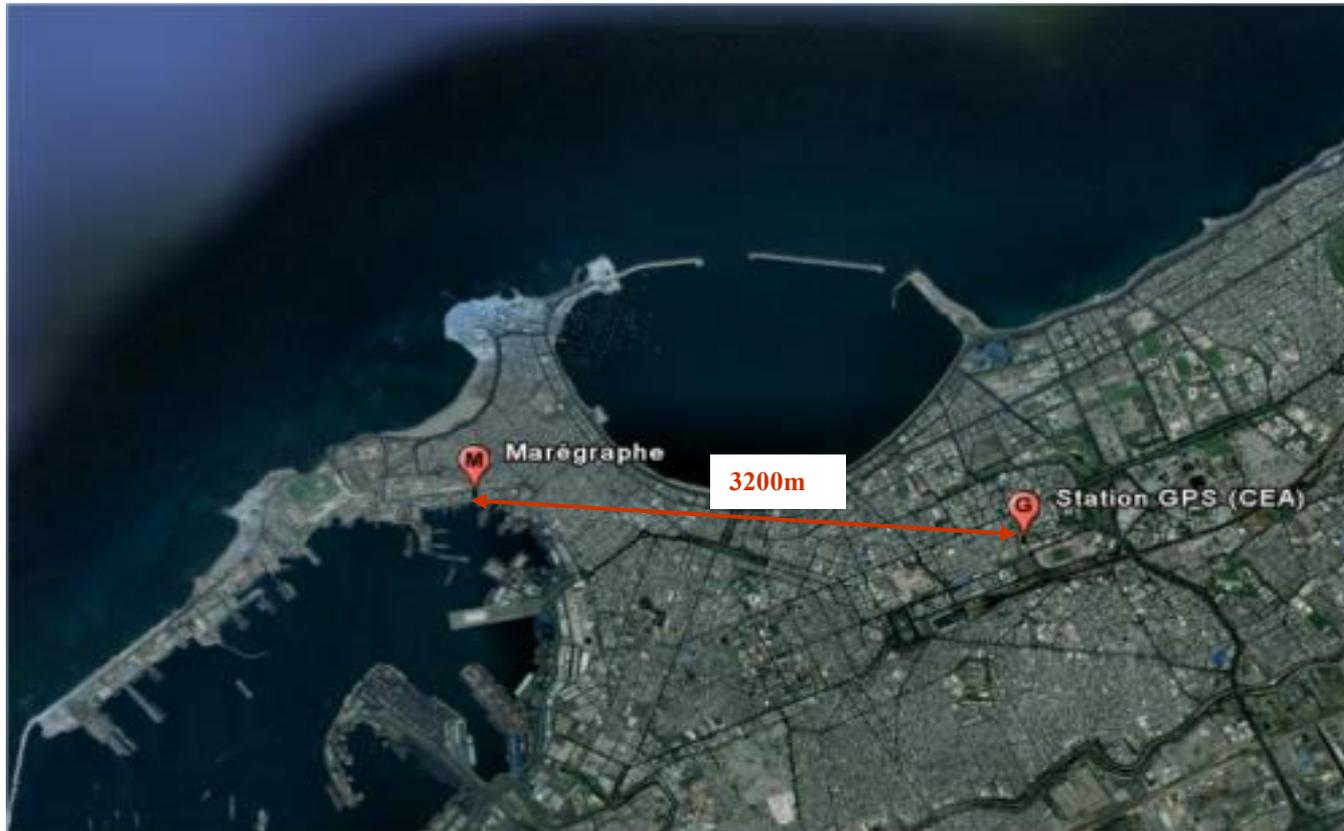
- InSAR conventionnel pour détecter des mouvements du sol centimétriques
- PSI uniquement si les mouvements verticaux du sol sont très faibles (millimétriques)

Carnec Delacourt, 1999; Raucoules et al., 2009

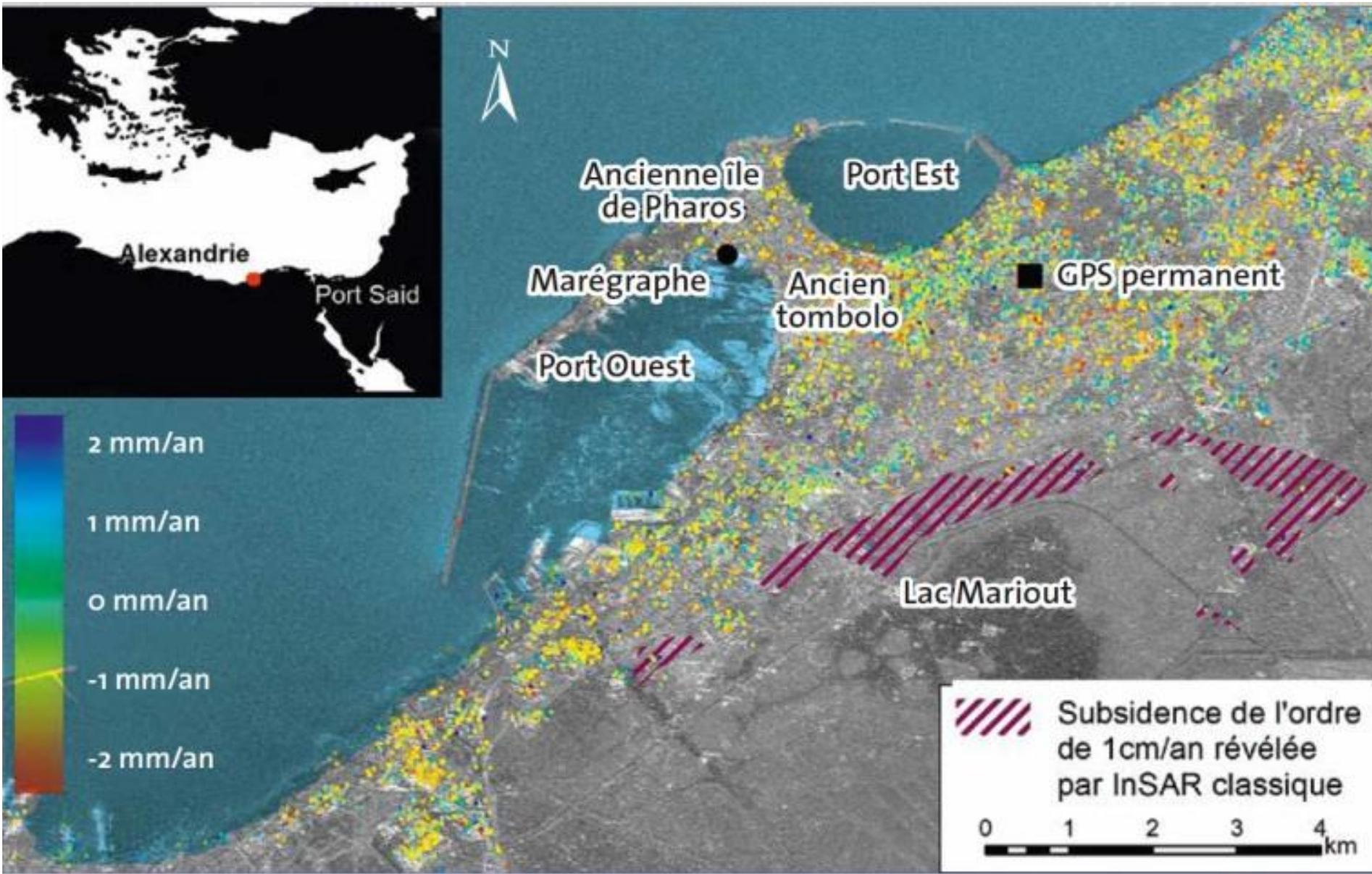
Peut-on qualifier un site marégraphique avec la méthode InSAR + PSI ?

Alexandrie, Egypte

- > Marégraphe clé pour étudier le niveau de la mer dans le sud est de la Méditerranée
- > Marge occidentale du delta du Nil

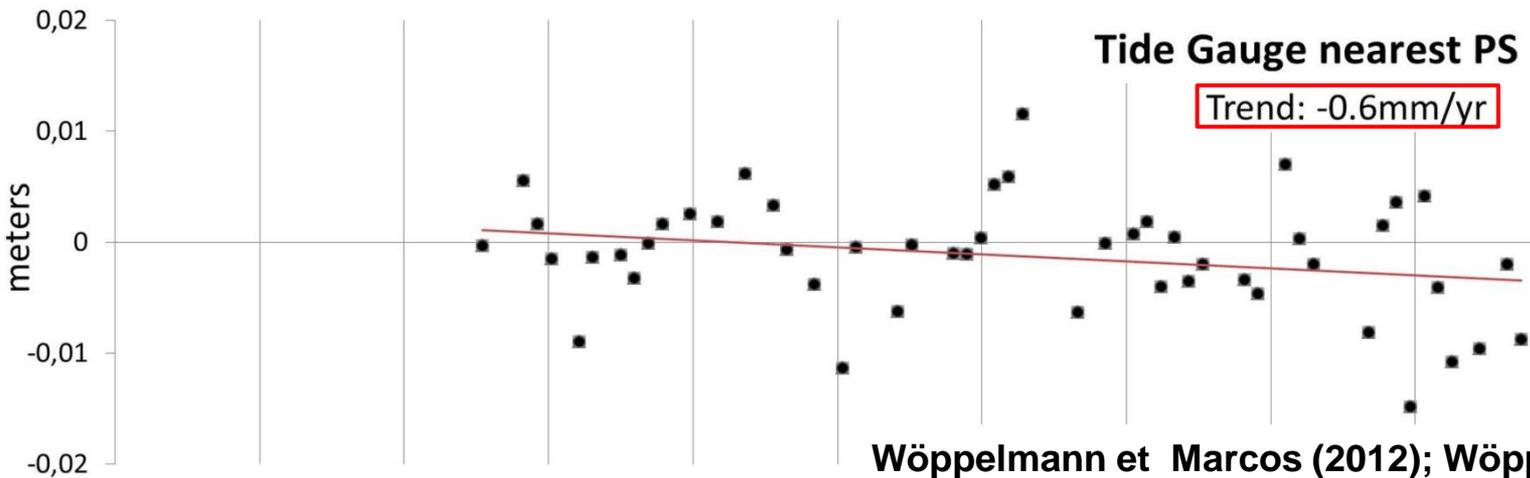
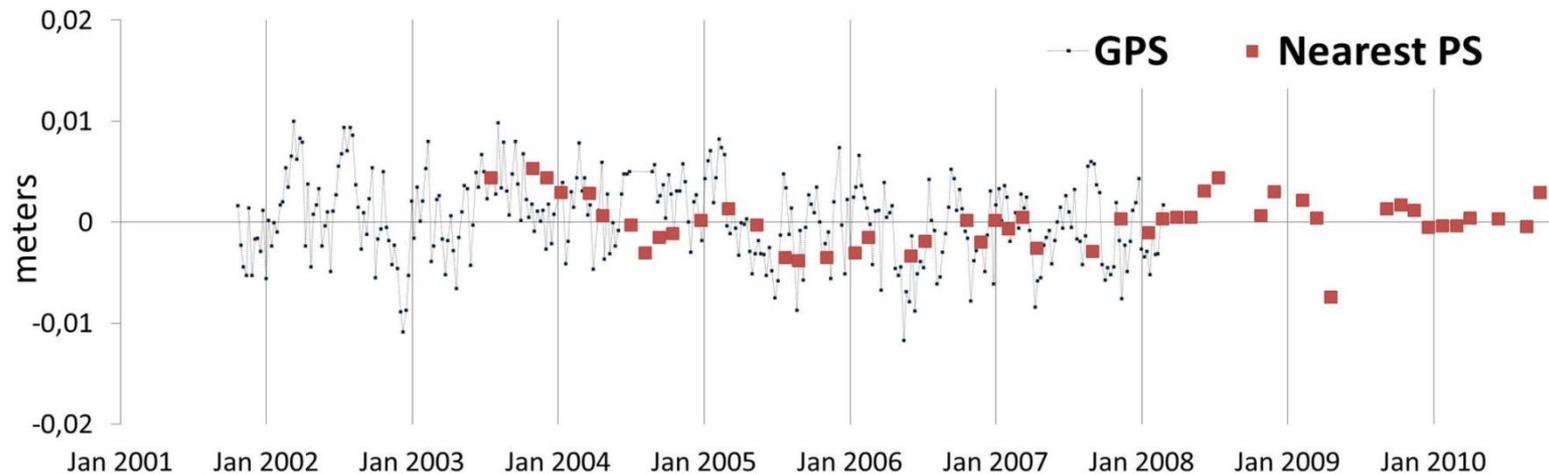


Empilement d'interférogrammes, puis méthode PSI



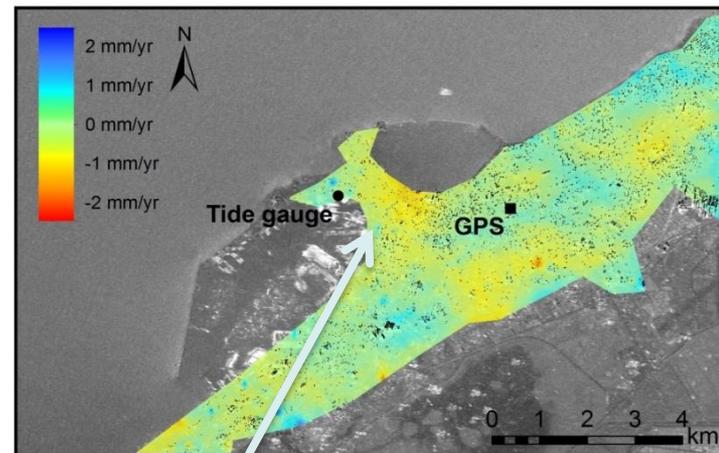
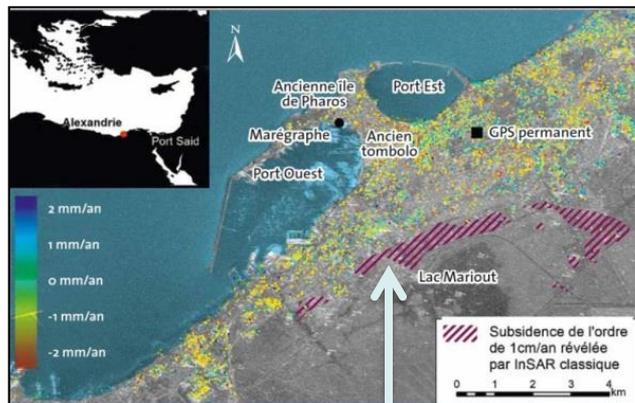
Les mesures PSI, GPS, marégraphiques et altimétriques sont cohérentes entre elles

Station (PSMSL)	Altimeter – TG Classical Approach ^b (1992–2010)	Altimeter – TG This Study/Advanced Approach ^c (All Data)
Santander I	-1.62 ± 0.43	0.91 ± 0.34
La Coruña I	0.19 ± 0.60	0.73 ± 0.33
...		
Alexandroupolis	0.01 ± 0.47	0.02 ± 0.28
Leros	3.63 ± 0.51	1.28 ± 0.35
Alexandria	0.37 ± 0.70	-0.40 ± 0.23



Wöppelmann et Marcos (2012); Wöppelmann et al. (2013)

Il est possible de proposer une interprétation géologique de certains mouvements observés



Marais :
zones basses
en subsidence
centimétrique

Bande urbaine

Marégraphie

Mouvements
verticaux du sol
conséquences
de séismes

Tombolo sableux Holocène
en subsidence modérée
(1 ou 2 mm/an)

Variations
du niveau
marin

Grès Pleistocène

Quels sont les marégraphes à observer en priorité?

- séries temporelles longues
- situés dans des régions où peu de stations sont disponibles

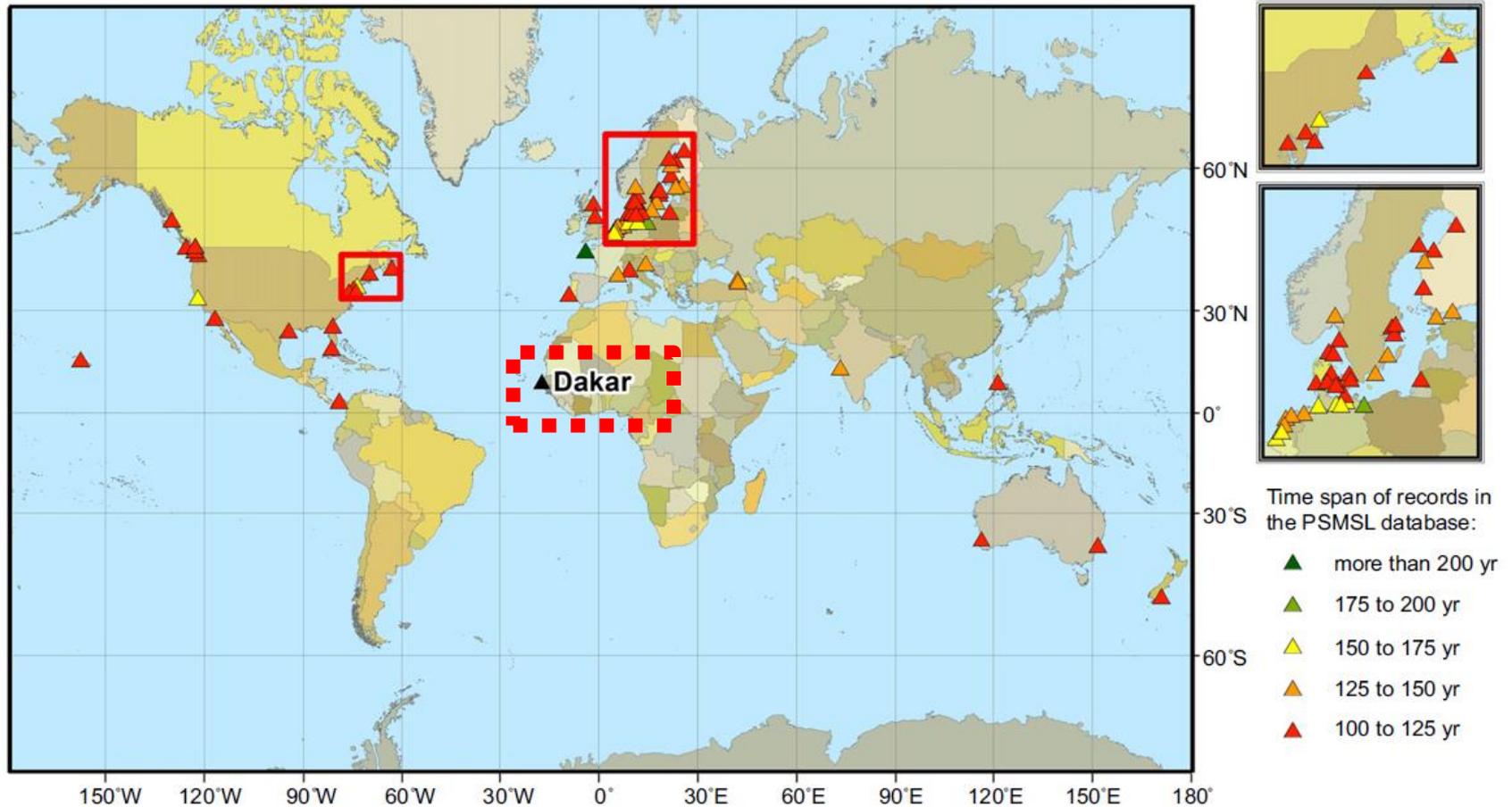
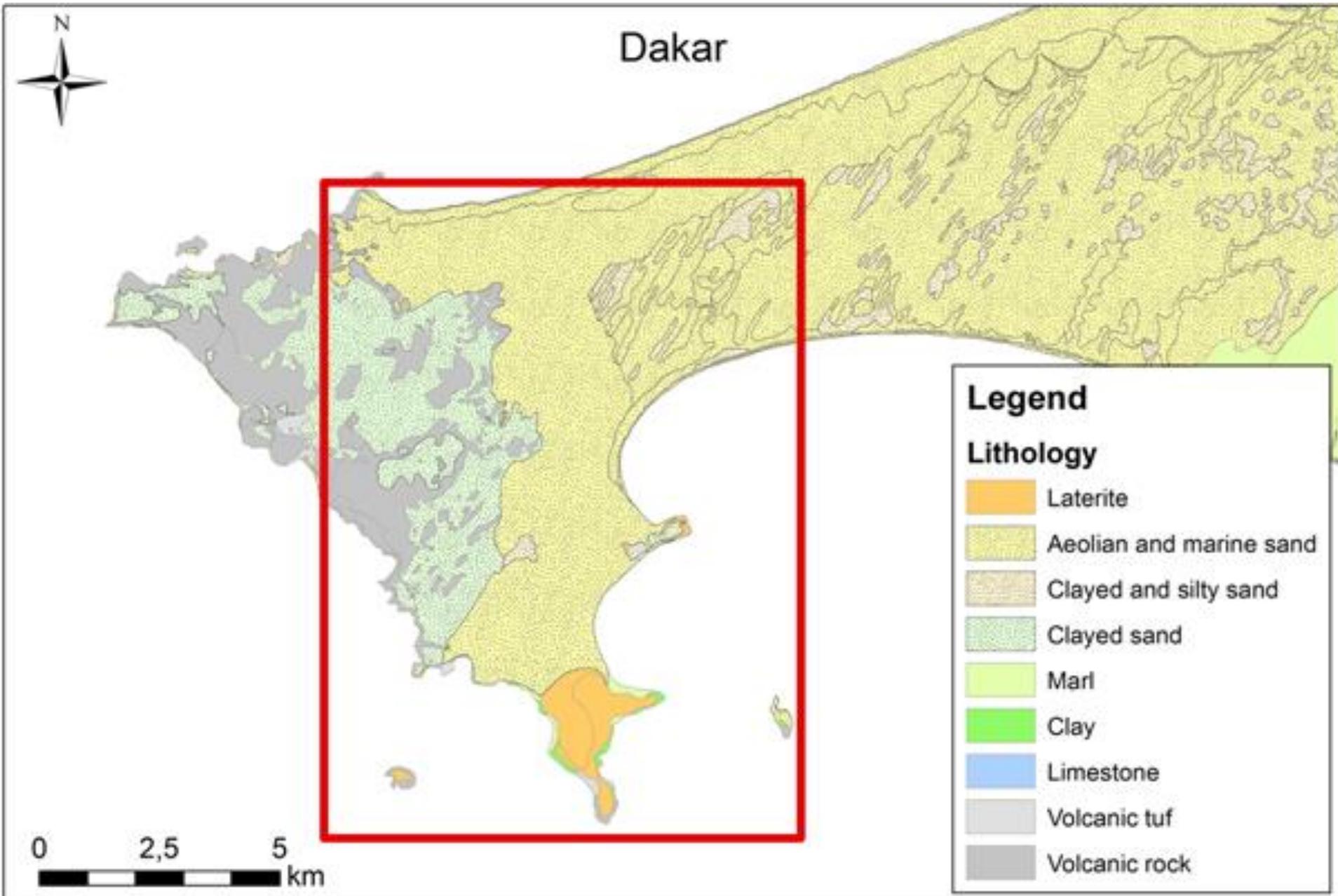


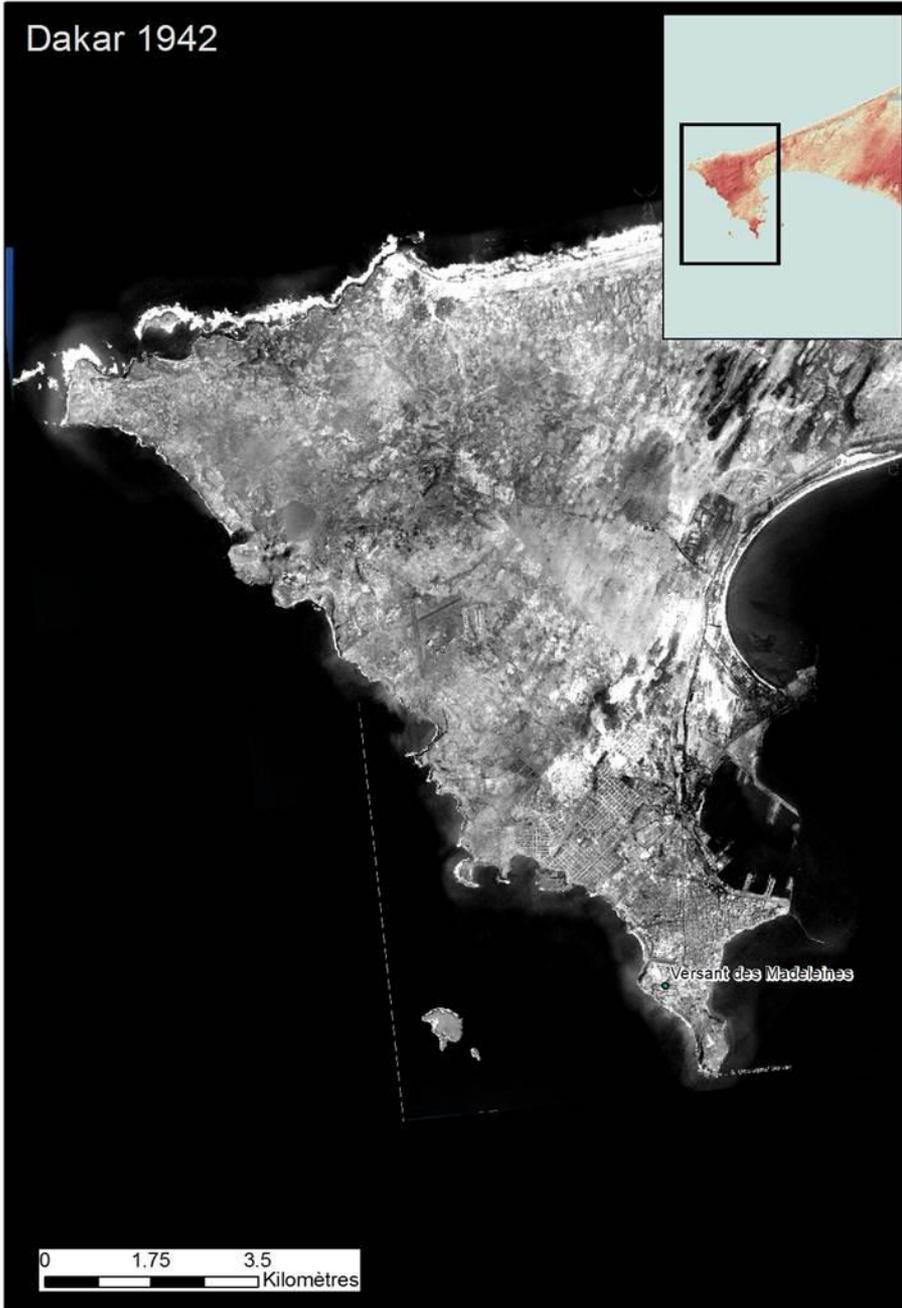
Figure 1. Location of the tide gauges with records longer than 100 years and at least 70% valid controlled data in the PSMSL data repository. Dakar is located in a coastal region of Africa, where no other sea-level records presently meet these criteria.

Dakar, Sénégal: géologie complexe

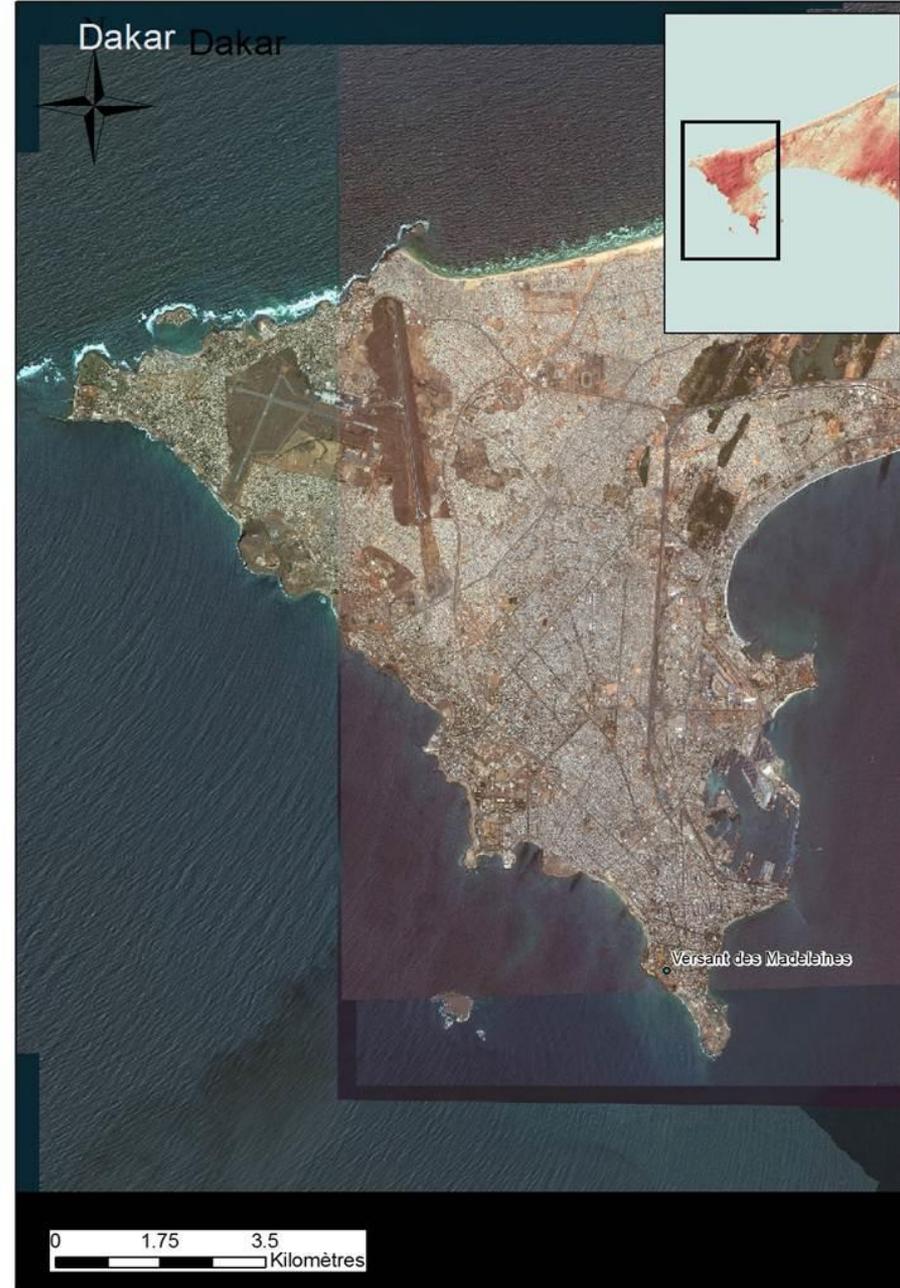


Développement urbain rapide

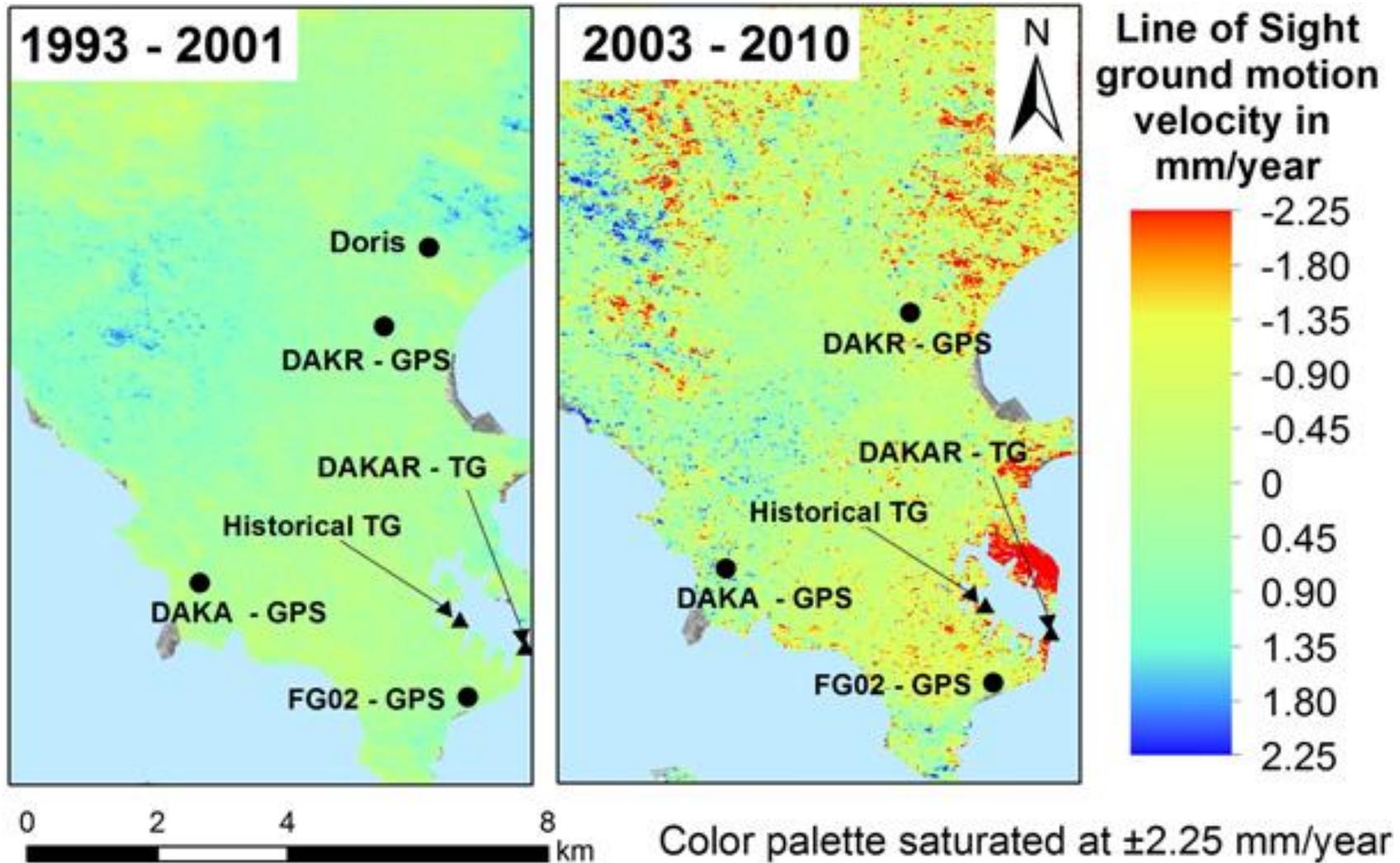
Dakar 1942



Dakar Dakar

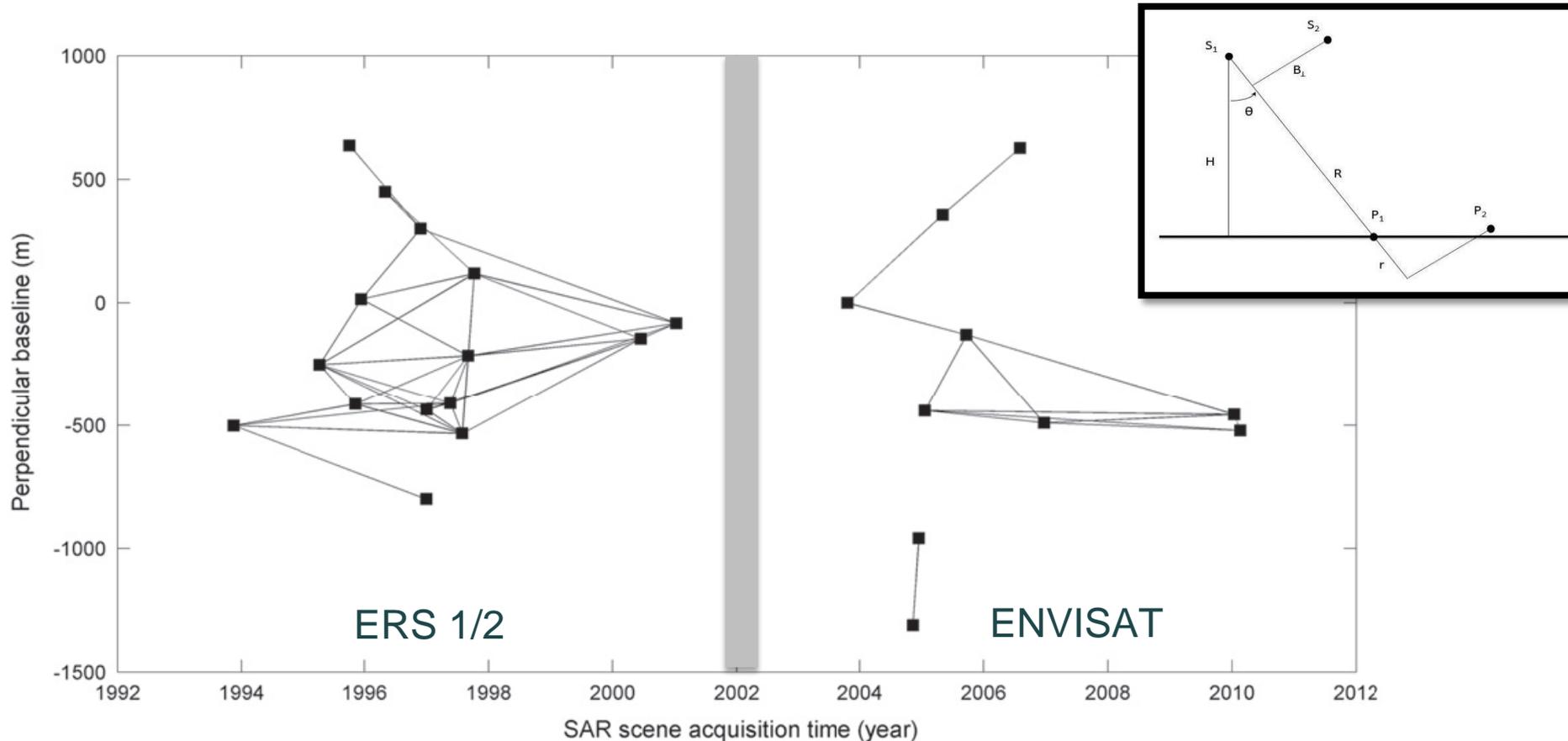


En pratique, on observe seulement des mouvements dans la partie nord du port (remblais, travaux)



Comment qualifier le site de Dakar?

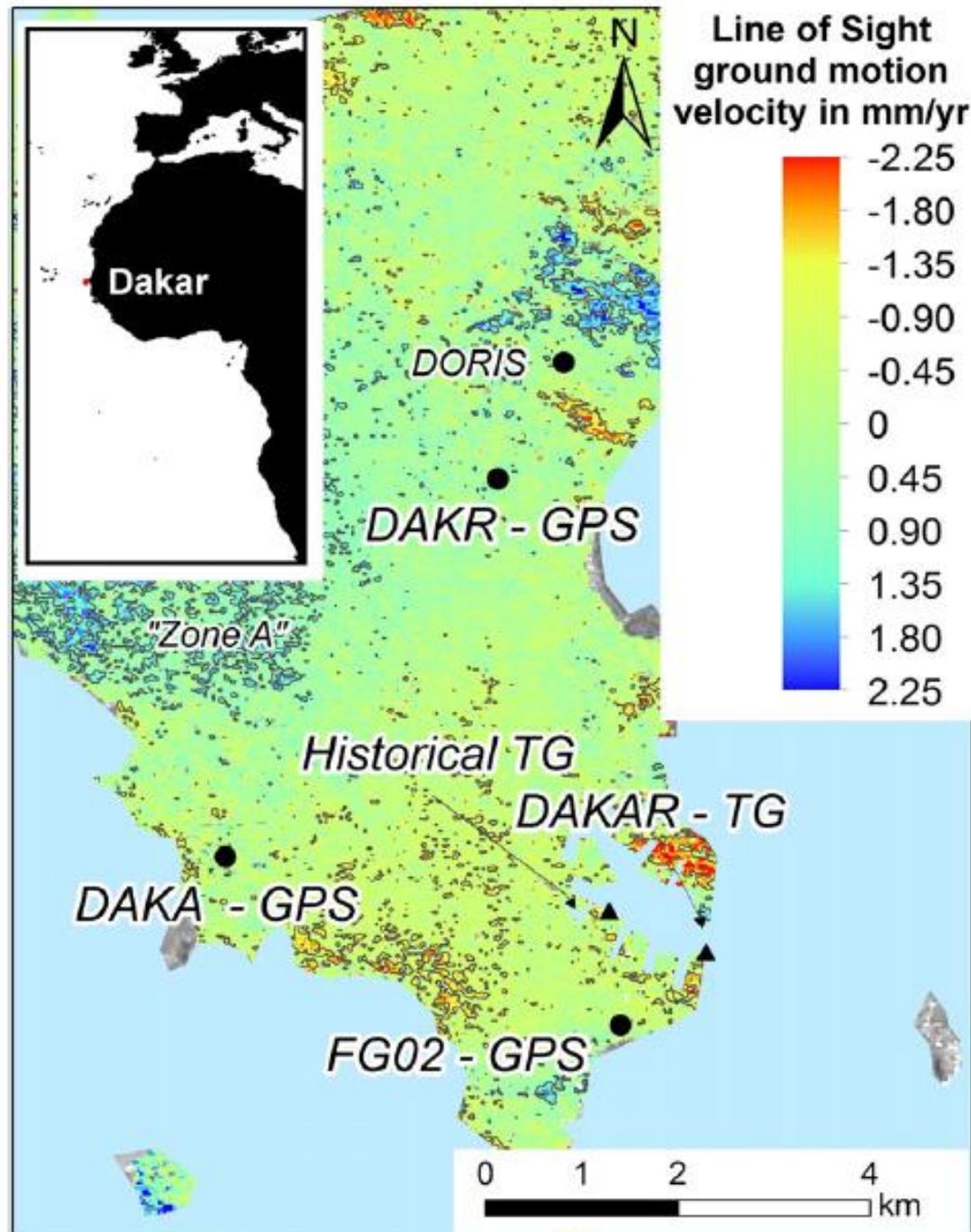
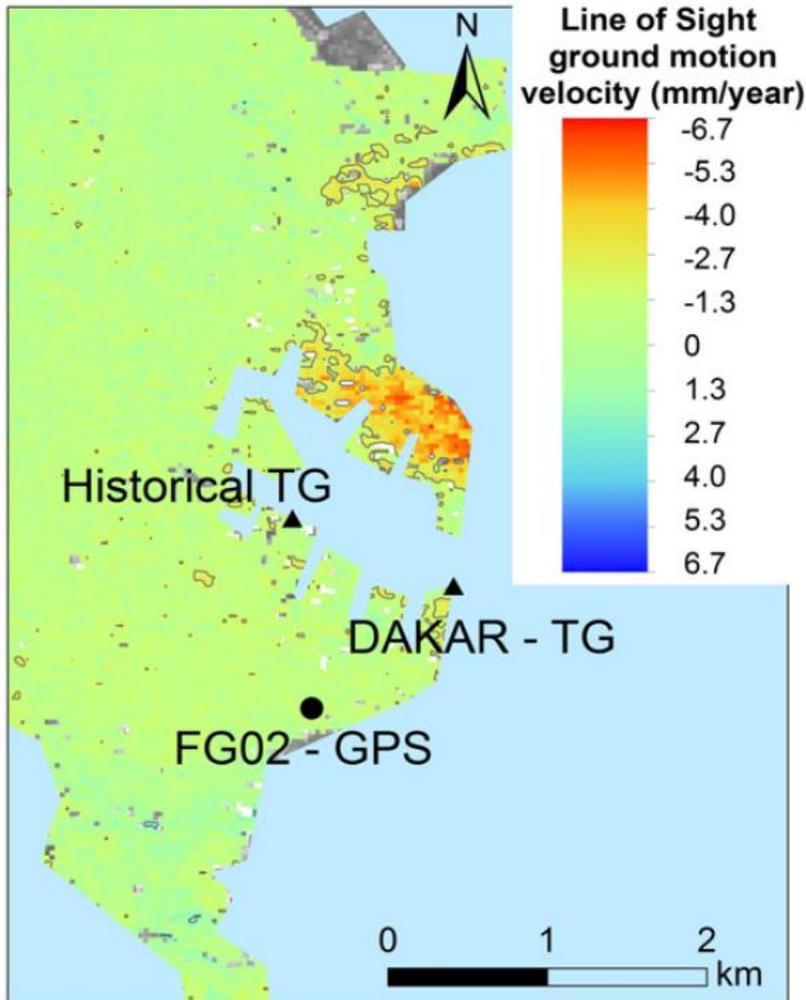
trop peu d'images sont disponibles pour atteindre les niveaux de précision submillimétriques



Il y a une astuce: recalcr les images SAR ERS et Envisat par rapport à la même image maîtresse, puis calculer les vitesses par moindres carrés, en empilant les interférogrammes déroulés (i.e. codés en nombres réels)

Vitesses de déformation du sol (2003/2010)

Erreurs < 1mm/an



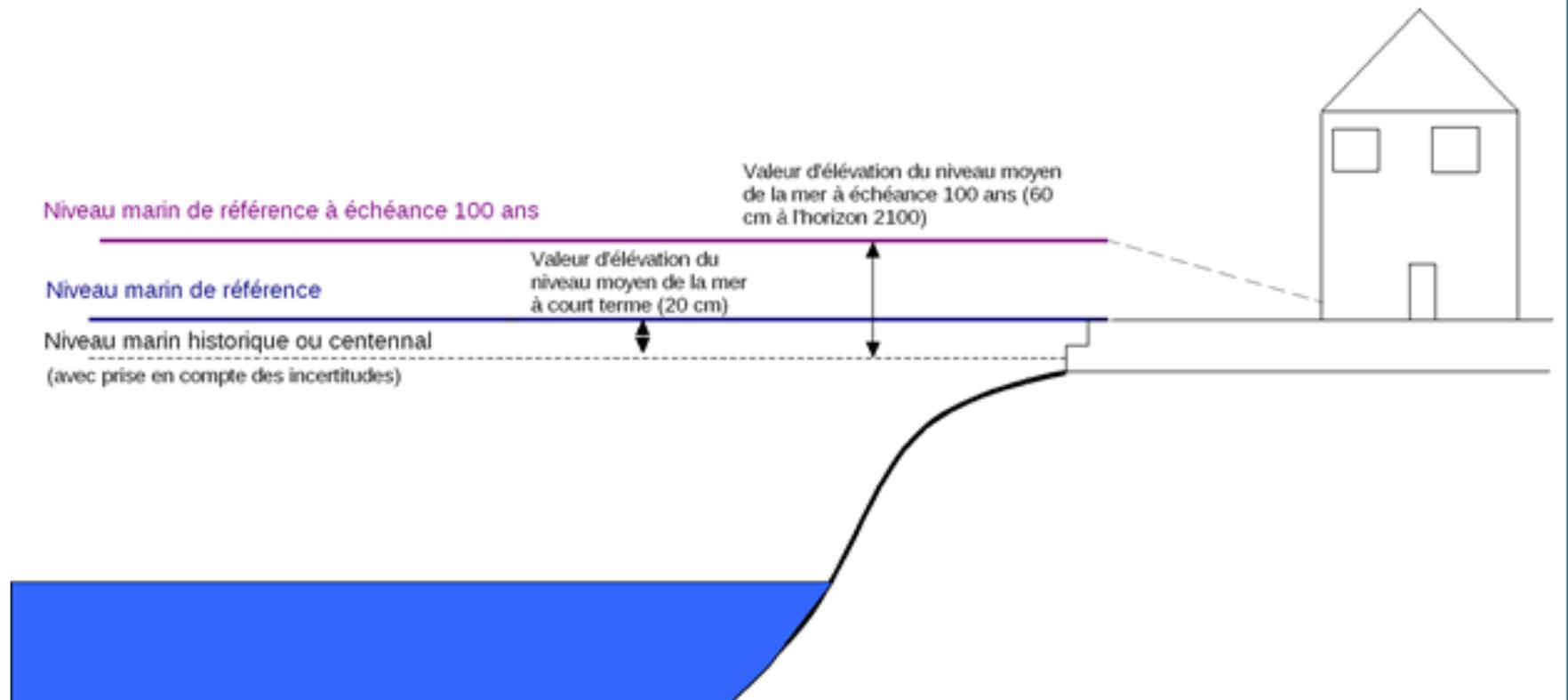
Apports de l'InSAR pour la mesure des mouvements verticaux du sol en zones urbaines côtières?

- > Application: évaluation de la stabilité des marégraphes:
 - Mesure de déformations du sol, jusqu'à une fraction de millimètres par an
 - Archives d'images depuis 1993
 - Besoin de définir une background mission adaptée

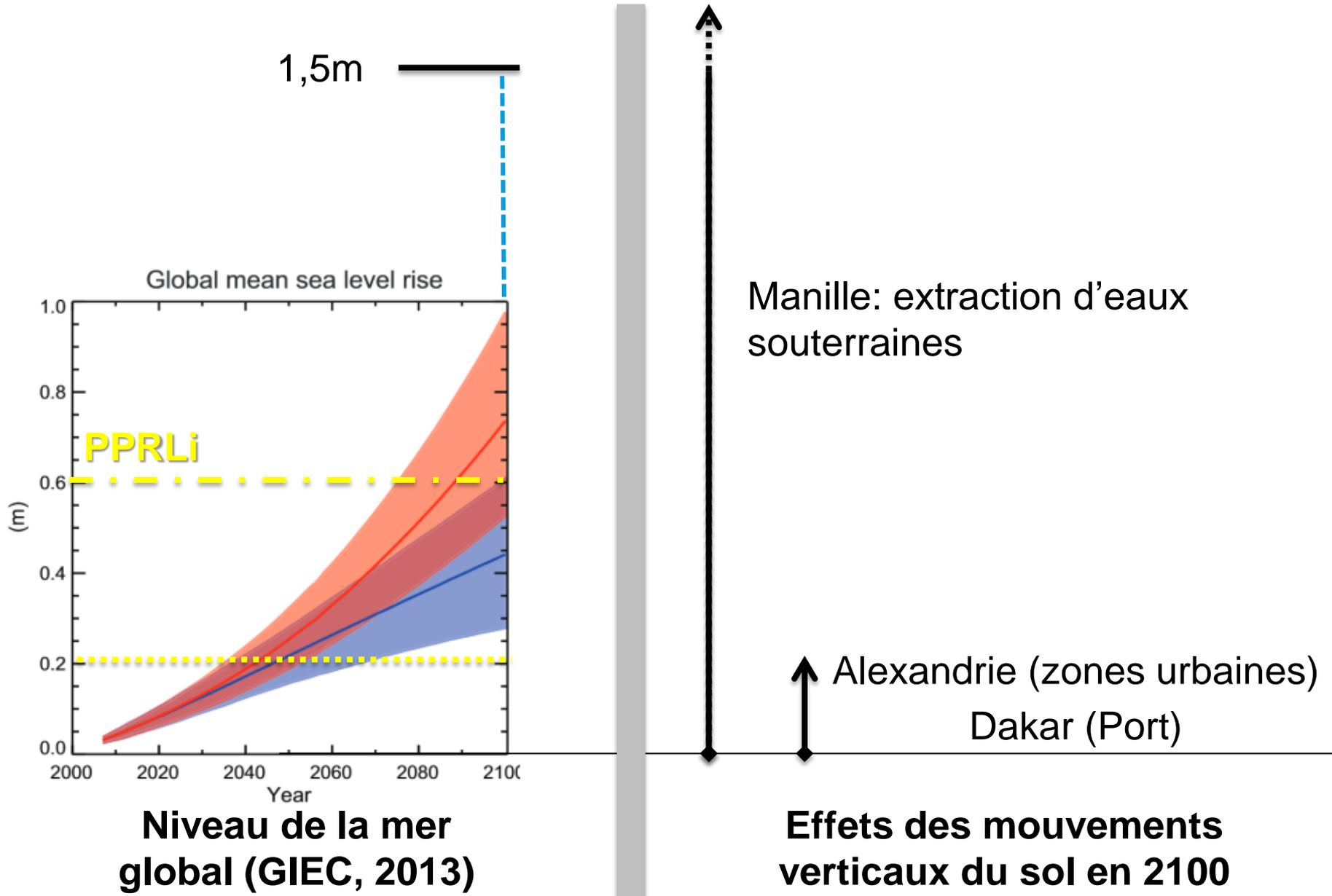


Faut-il prendre en compte les mouvements verticaux du sol pour planifier l'adaptation?

- > Depuis 2011, les plans de prévention des risques littoraux intègrent un scénario avec 60cm d'élévation du niveau de la mer



Les mouvements verticaux du sol: est-ce important pour les impacts du niveau de la mer ?



Conclusion

- > Les mouvements verticaux du sol en zones côtières restent mal connus
- > En combinant des observations géodésiques, il devient possible d'évaluer les mouvements verticaux du sol
- > Besoin d'observations

Merci de votre attention

Projets: ANR CECILE; BRGM-EVARISTE

Données: ESA, SONEL, PSMSL

Chaîne de traitement interférométrique: GAMMA

g.lecozannet@brgm.fr

Raucoules, D., Bourguin, B., De Michele, M., Le Cozannet, G., Closset, L., Bremmer, C., ... & Agudo, M. (2009). Validation and intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 project results. *Journal of Applied Geophysics*, 68(3), 335-347.

Wöppelmann, G., Le Cozannet, G., Michele, M., Raucoules, D., Cazenave, A., Garcin, M., ... & Santamaría-Gómez, A. (2013). Is land subsidence increasing the exposure to sea level rise in Alexandria, Egypt?. *Geophysical Research Letters*, 40(12), 2953-2957.

Raucoules, D., Le Cozannet, G., Wöppelmann, G., De Michele, M., Gravelle, M., Daag, A., & Marcos, M. (2013). High nonlinear urban ground motion in Manila (Philippines) from 1993 to 2010 observed by DInSAR: implications for sea-level measurement. *Remote Sensing of Environment*, 139, 386-397.

Bulteau, T., Baills, A., Petitjean, L., Garcin, M., Palanisamy, H., & Le Cozannet, G. (2015). Gaining insight into regional coastal changes on La Réunion island through a Bayesian data mining approach. *Geomorphology*, 228, 134-146.

Le Cozannet, G., Raucoules, D., Wöppelmann, G., Garcin, M., Da Sylva, S., Meyssignac, B., ... & Lavigne, F. (2015). Vertical ground motion and historical sea-level records in Dakar (Senegal). *Environmental Research Letters*, 10(8), 084016.