3.2.6. APPORT DES MESURES GÉODÉSIQUES : MAREGRAPHIE

1. Introduction

Cette année le rapport distingue les activités d'observatoire du niveau de la mer, qui se retrouvent dans la section 1.3 et rapportent de l'évolution de l'infrastructure des systèmes d'observation et des questions de métrologie du niveau de la mer *in situ* à la côte, des activités de recherche en relation avec les systèmes de référence et leurs applications. La relation historique entre marégraphie et géodésie est rappelée dans un article du numéro thématique « La Terre observée depuis l'espace » du journal *C.R. Geoscience* (Wöppelmann et al. 2006). La marégraphie manque de visibilité scientifique en partie en raison de définitions réductrices aux techniques de mesure ou à la marée. Ainsi, la définition proposée par B. Simon[a] (« Par son étymologie, le terme marégraphie se rapporte à la description du phénomène de marée et aux instruments qui, par leurs mesures, en ont permis une meilleure connaissance ») est étendue[b] à la description des autres phénomènes (pas seulement la marée) qui affectent le niveau de la mer et qui sont effectivement observés par les marégraphes. Elle est légitimée de fait par les nombreuses applications qui expliquent le regain d'intérêt pour les marégraphes depuis une vingtaine d'années (ondes de tempêtes, tsunamis, variations climatiques,…).

2. Courte synthèse des travaux en 2009

Les principaux résultats obtenus en 2009 dans la problématique de la détermination des mouvements verticaux des marégraphes et la compréhension de l'évolution du niveau de la mer enregistrée par ces instruments depuis parfois plus de cent ans sont résumés ainsi :

- Publication d'un champ de vitesses verticales issu de l'analyse en réseau global de mesures GPS sur 10 ans (1997-2006) en co-localisation avec des marégraphes (Wöppelmann et al. 2009a).

- Exploitation de ce champ de vitesses GPS confirmant et améliorant les résultats préliminaires publiés en 2007 (dispersion significativement réduite des tendances individuelles et régionales des marégraphes corrigées par GPS).

- Extension de l'application du champ de vitesses GPS en vue d'une évaluation externe géophysique, en particulier via une confrontation aux prédictions des modèles d'ajustement glacio-isostatique (Bouin & Wöppelmann 2010).

- Evaluation de l'impact du changement de repère terrestre dans lequel sont exprimés les résultats (ITRF2000 versus ITRF2005), et des effets de réseau dans l'analyse des mesures GPS et la réalisation du repère terrestre (Legrand et al. *in press*).

- Développement de l'infrastructure de calculs GPS, matérielle et logicielle. Portage des logiciels GAMIT/GLOBK et CATREF sur un cluster Linux de 128 nœuds de calcul. Acquisition des outils d'analyse de bruit dans les séries temporelles de positions (S. Williams du POL).

- Définition d'une nouvelle stratégie de calcul GPS incorporant l'état de l'art des modèles et des corrections (Santamaria et al. 2009a ; 2009b), et préparation d'un nouveau champ de vitesses GPS étendu à 310 stations sur 13 ans (1996-2008), en évaluation (Santamaria et al. 2009c).

Les principaux résultats obtenus en 2009 sont décrits en détail dans les articles publiés dans les revues spécialisées de rang international (cf. références bibliographiques). Une sélection est proposée ici à l'aide de figures extraites des diverses communications écrites ou orales effectuées en 2009. Elle illustre la dynamique positive et la place conquise sur la scène internationale.

3. Une sélection de résultats

Les résultats publiés par Wöppelmann et al. (2009) montrent que la dispersion des tendances individuelles des marégraphes est notablement réduite après application de la correction des vitesses verticales GPS, aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle des groupements régionaux effectués par Douglas (2001) sur des considérations océanographiques. La figure 1 illustre ceci dans deux régions, en Europe du Nord et en Amérique du Nord-Ouest : à gauche sont présentées des séries de niveaux moyens de la mer mesurés par marégraphie ; au milieu les séries sont corrigées avec les prédictions du modèle glacio-isostatique ICE5G (VM2) ; et à droite avec les vitesses GPS obtenues par le centre d'analyses ULR dans le repère ITRF2005.

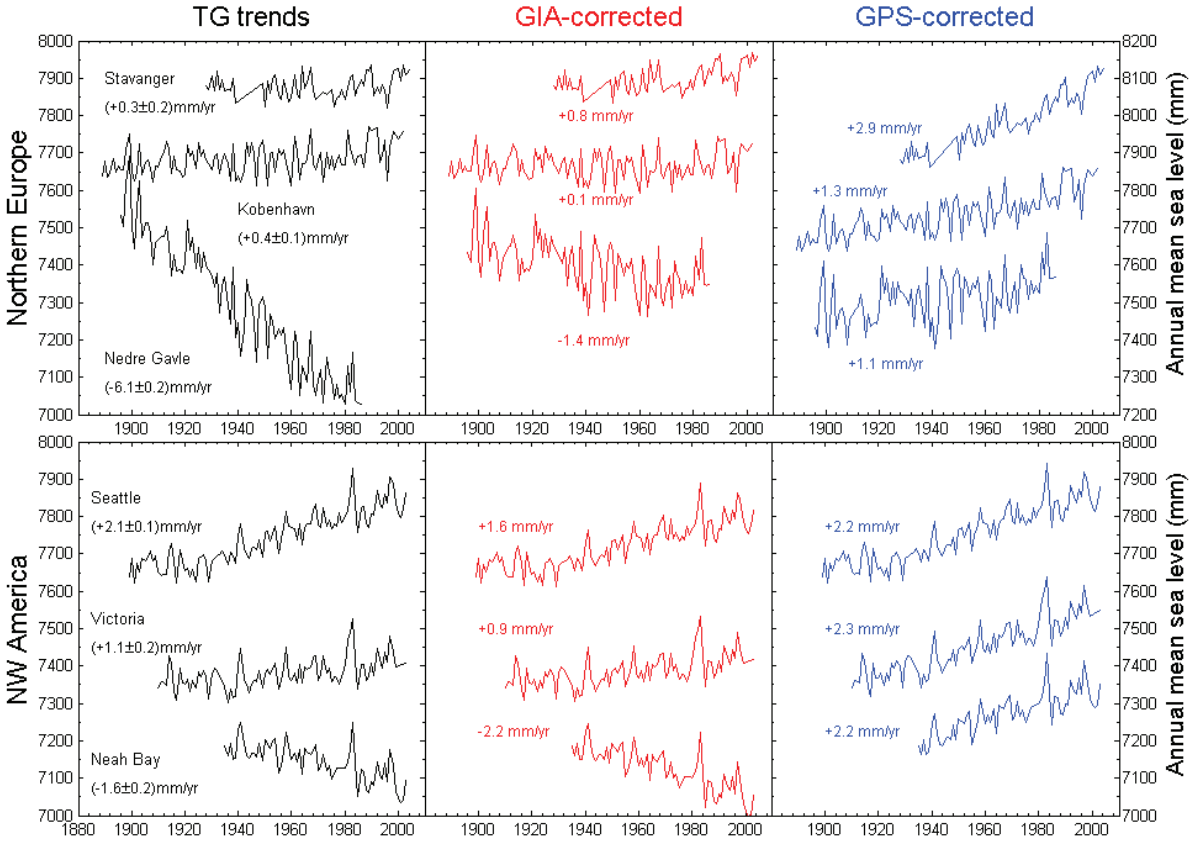

Fig. 1 : Séries temporelles de valeurs moyennes annuelles du niveau marin issues: i) de marégraphes (panneaux de gauche) ; ii) de marégraphes corrigés des prédictions du modèle de rebond postglaciaire ICE-5G VM2 (au centre) ; et iii) de marégraphes corrigés avec des résultats GPS (à droite) ; en Europe du Nord (panneaux du haut) et en Amérique du Nord-Ouest (panneaux inférieurs).

Le traitement des observations GPS est particulièrement complexe pour déterminer les mouvements verticaux ténus du sol sur lequel reposent les marégraphes (mouvements de l'ordre du mm/an). Cela reste un défi en géodésie, posant des questions fondamentales, par exemple dans la réalisation d'un repère de qualité suffisante (origine, échelle), et des limites techniques. Des ressources importantes sont nécessaires, en particulier de calcul mais pas seulement car les stations sont nombreuses et réparties autour du globe (collectes à distance, archivage, gestion des données). Le centre d'analyses ULR (IGS/TIGA) s'appuie sur l'infrastructure informatique développée à l'université de La Rochelle. Le cluster Linux de 128

nœuds de calcul acquis en 2008 a permis de réduire les temps de calculs GPS. Les tests effectués ont montré que dix ans d'observations GPS d'un réseau de 220 stations pouvaient être recalculés en une semaine (contre un an auparavant), récompensant ainsi les mois de travail de l'équipe ULR en 2008 et 2009, qui a reçu un soutien précieux du centre de ressources informatiques de l'université dans le portage des logiciels GAMIT, GLOBK, et CATREF.

Des difficultés techniques restent encore à résoudre, mais les nouvelles capacités de calcul donnent à l'ULR la perspective de pouvoir égaler les groupes qui participent à l'IGS. Elles ouvrent des perspectives enthousiasmantes d'expérimentation. Ainsi, dans le cadre de la thèse de doctorat de A. Santamaria, la stratégie d'analyse des mesures GPS est revue de manière critique : modèles (troposphère), corrections (centres de phase des antennes des stations et des satellites), paramétrisation et stratégie d'ajustement (orbites, orientation de la terre, réseau). De nombreux tests ont été conduits, présentés, et discutés dans des rencontres internationales (Santamaria et al. 2009a ; 2009b) afin de s'assurer que l'état de l'art des connaissances était bien implémenté. Un nouveau champ de vitesses GPS est obtenue, étendu à quelque 310 stations (contre 225 dans Wöppelmann et al. 2009a) sur une période plus longue (1996-2008). Il est en cours d'évaluation (Santamaria et al. 2009c) et sera publié en 2010. La figure 2 illustre le gain notable dans la qualité des vitesses verticales de la nouvelle solution (ULR4) par rapport à la précédente (ULR3). Les écart-types sont estimés en prenant en compte la nature et le niveau du bruit dans les séries temporelles. Le bruit dans les séries temporelles des stations GPS est réduit de l'ordre de 30 à 45% suivant les composantes et les stations considérées.

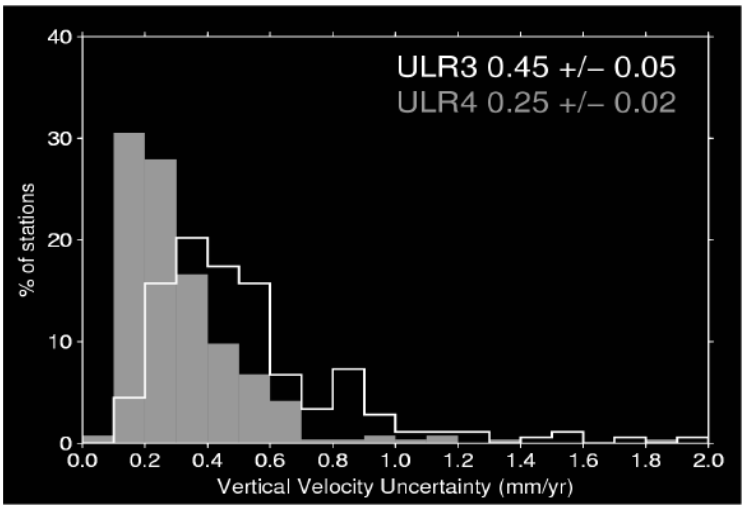

Fig. 2 : Histogrammes des écart-types des vitesses verticales de la solution GPS en cours de préparation (ULR4) et de la précédente (ULR3) publiée en 2009 (Wöppelmann et al. 2009a)

4. Conclusions et Perspectives

Si le centre d´analyses ULR a émergé sur la scène internationale en 2007 avec la publication des premiers résultats, l'année 2009 consacre sa reconnaissance avec l'invitation du service international IGS à concourir à sa 1ère campagne de *reprocessing* (http://acc.igs.org/reprocess.html), mais aussi à rejoindre avec sa solution publiée en 2009 la réalisation du prochain repère ITRF2008 et à contribuer au groupe de travail '*Regional Dense Velocities*' de l'association internationale de Géodésie (Bruyninx et al. 2009, http://www.epncb.oma.be/IAG/objectives.php). Nos résultats sont également remarqués par le groupe d'experts du programme mondial d'observation du niveau de la mer GLOSS de la Commission océanographique internationale comme le témoigne la participation française au workshop *Precision Observations of Vertical Land Motion at Tide Gauges*, qui s'est tenu à l'Unesco en mai 2009 (Merrifield et al. 2009 ; Wöppelmann et al. 2009b).

Maintenant que le centre d'analyses ULR est remarqué sur la scène internationale, il conviendra d'asseoir durablement l'infrastructure mise en place et de progresser aux côtés des

meilleurs en consolidant les moyens de l'équipe ULR. Sans aucun doute les retours de l'IGS et de l'ITRF seront très riches en enseignements et permettront de progresser dans la maîtrise fine des analyses GPS, aussi bien pour l'application visée (mouvements verticaux des marégraphes) que pour les exploitations géodynamiques que nous commençons à entrevoir en collaboration (Amalvict et al. 2009 ; Bruyninx et al. 2009 ; Legrand et al. in press ; Letetrel et al. 2009).

5. Participants au projet

Guy WOPPELMANN, Coordinateur rédaction du chapitre (Université La Rochelle)

Marie-Noëlle BOUIN, Chercheur (CNRM, Météo-France)

Xavier COLLILIEUX, Chercheur (IGN/LAREG)

Mikael GUICHARD, Ingénieur (Université La Rochelle)

Camille LETETREL, Doctorante à l'Université de la Rochelle

Pascal TIPHANEAU, Technicien (Université La Rochelle)

Alvaro SANTAMARIA, Doctorant au LAREG (IGN)

6. Références bibliographiques (2009)

Amalvict, M., Willis, P., Wöppelmann, G., Ivins, E., Bouin, M-N., Testut, L., Hinderer, J., 2009. Stability of the East Antarctic station Dumont d'Urville from long-term time series of geodetic and geophysical observations. *Polar Research, 28,* 193-202.

Bouin, M-N., and Wöppelmann, G., 2010. Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation. *Geophysical Journal International, 180*, 193-209.

Bruyninx, C., Altamimi, Z., Becker, M., Craymer, M., Combrinck, L., Combrink, A., Dawson, J., Dietrich, R., Fernandes, R., Govind, R., Herring, T., Kenyeres, A., King, B., Kreemer, C., Lavallée, D., Legrand, J., Sànchez, L., Sella, G., Shen, Z., Wöppelmann, G., *accepted*. A Dense Global Velocity based on GNSS Observations: Preliminary Results". IAG General Assembly 2009, Geodesy for Planet Earth.

Collilieux, X. and Wöppelmann, G., 2009. Global sea-level rise and its relation to the terrestrial reference frame definition. AGU Fall Meeting, San Francisco, 14-18 December 2009, Session G11C "Terrestrial Reference Systems: Theory, Realizations, and Applications".

Legrand, J., Bergeot, N., Bruyninx, C., Wöppelmann, G., Bouin, M-N., Altamimi, Z., *in press*. Impact of Regional Reference Frame Definition on Geodynamic Interpretations. *Journal of Geodynamics*, doi:10.1016/j.jog.2009.10.002.

Letetrel, C., Karpytchev, M., Wöppelmann, G., 2009. Reconstruction of sea level variability in the Gulf of Mexico during the period 1950-2007. AGU Fall Meeting, San Francisco, 14-18 December 2009, Session G53C "Quantifying Sea Level Change".

Merrifield, M., Aarup, T., Aman, A., Caldwell, P., Fernandes, R. M. S., Hayashibara, H., Kilonsky, B., Martin Miguez, B., Mitchum, G., Perez Gomez, B., Rickards, L., Rosen, D., Schöne, T., Testut, L., Woodworth, P., Wöppelmann, G., 2009. The Global Sea Level Observing System (GLOSS). In *OceanObs'09*, Ocean Information for society: sustaining the benefits, organizing the potential, Community White Papers, 21-25 Sept. 2009, Venice, Italy.

Santamaria, A., Bouin, M-N., Wöppelmann, G., 2009a. Impact of sub-network configuration on global scale GPS processing. EGU General Assembly, Vienna, Austria, 20-24 April 2009, Session G1, EGU2009-3257.

Santamaria, A., Bouin, M-N., Wöppelmann, G., 2009b. Overview of current GPS reprocessing strategy at ULR TIGA Analysis Center. 11th session of the GLOSS Group of Experts and associated Workshop, Unesco, Paris, 11-15 May 2009.

Santamaria, A., Bouin, M-N., Wöppelmann, G., 2009c. Improved GPS data analysis strategy for tide gauge benchmark monitoring. IAG General Assembly 2009, Geodesy for Planet Earth.

Wöppelmann, G., Letetrel, C., Santamaria, A., Bouin, M-N., Collilieux, X., Altamimi, Z. Williams, S.D.P., Martin Miguez, B., 2009a. Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophys. Res. Lett.*, *36*, L12607, doi:10.1029/2008GL038720.

Wöppelmann, G., Schöne, T., Williams, S.D.P., Sella, G., 2009b. Report from Session 3 "Present geodetic network status". Workshop on Precision Observations of Vertical Land Motion at Tide Gauges, Paris, UNESCO, 11-12 May 2009.