



Méthodologie GPS, mesure des déformations verticales et humidité atmosphérique

M.-N. Bouin

► To cite this version:

M.-N. Bouin. Méthodologie GPS, mesure des déformations verticales et humidité atmosphérique. Autre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2010. tel-00519369

HAL Id: tel-00519369

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00519369>

Submitted on 20 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Méthodologie GPS, mesure des déformations verticales et humidité atmosphérique

Mémoire d'habilitation à diriger les recherches

présenté par

Marie-Noëlle Bouin

à l'Université de Bretagne Occidentale

soutenue le 19 janvier 2010
devant le jury composé de

Christophe Delacourt, IUEM/UBO	président
Pierre Briole, ENS Paris	rapporteur
Eric Calais, Univ. Purdue	rapporteur
Frédéric Masson, IPGS/EOST	rapporteur
Marcia Maia, IUEM/UBO	
Joël Poitevin, CNRM Météo France	

PREMIERE PARTIE : RAPPORT SCIENTIFIQUE	5
RESUME.....	7
I INTRODUCTION	9
II GEODYNAMIQUE ET COMPOSANTE VERTICALE.....	11
II-1 ZONE DE DEFORMATION RAPIDE ET COMPOSANTE VERTICALE.....	14
<i>Contexte.....</i>	14
<i>Résultats</i>	15
<i>Perspectives.....</i>	17
II-2 VARIATION A LONG TERME DU NIVEAU DE LA MER.....	19
<i>Contexte.....</i>	19
<i>Résultats</i>	20
<i>Perspectives.....</i>	23
II-3 MESURE DE LA SURCHARGE OCEANIQUE.....	24
<i>Contexte.....</i>	24
<i>Résultats</i>	25
III GPS ET VAPEUR D'EAU ATMOSPHERIQUE	26
III-1 METHODOLOGIE : DU PRODUIT DERIVE A L'OUTIL INNOVANT.....	27
<i>Contexte.....</i>	27
<i>Résultats</i>	28
III-2 GPS ET MOUSSON AFRICAINE.....	32
<i>Contexte.....</i>	32
<i>Résultats</i>	34
<i>Perspectives.....</i>	36
IV EVOLUTION THEMATIQUE : POSITIONNEMENT SOUS MARIN ET SURFACE DE LA MER.....	37
IV-1 DU GPS A LA GEODESIE SOUS MARINE	38
<i>Contexte.....</i>	38
<i>Résultats</i>	39
<i>Perspectives.....</i>	40
IV-2 LE GPS COMME COMPLEMENT A L'ALTIMETRIE	41
<i>Contexte.....</i>	42
<i>Résultats</i>	43
<i>Perspectives.....</i>	45
V CONCLUSION ET PERSPECTIVES	45
Références bibliographiques citées dans le texte	45
SECONDE PARTIE : INFORMATIONS BIOGRAPHIQUES.....	53
Parcours professionnel	55
Campagnes de terrain	57
Collaborations	57
Production scientifique.....	59

Première partie : Rapport scientifique

Composante verticale GPS : méthodologie et applications.

Résumé

Pendant 10 ans, j'ai travaillé au LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie de l'IGN) sur la méthodologie du traitement GPS pour le positionnement vertical précis, avec plusieurs applications à des domaines variés des sciences de la Terre. J'ai cherché : 1) à mettre en évidence et quantifier les sources d'incertitudes, qu'elles viennent d'effets physiques (traversée de l'atmosphère par les signaux GPS en particulier) ou géodésiques (effets géométriques ou de systèmes de référence..) ; 2) à obtenir les résultats les plus précis, voire les plus exacts possible, en développant une méthodologie adaptée. Les domaines d'application où j'ai obtenu des résultats novateurs sont :

- la déformation d'une zone de subduction rapide, l'arc des Vanuatu. Sur cette zone bien instrumentée par l'IRD depuis plus de 15 ans, nous avons obtenu un champ de vitesses 3D précis grâce à un traitement adapté et cohérent. On met ainsi en évidence l'effet de la Ride d'Entrecasteaux, relief sous marin qui s'engage dans la subduction, sur les vitesses verticales proches de la fosse et très probablement sur le cycle sismique.
- l'étude des variations à long terme du niveau de la mer. La mise en place d'un centre d'analyse GPS des données des stations colocalisées avec les marégraphes d'un réseau mondial permet, avec près de 10 ans de données continues traitées de 1) proposer un champ de vitesses verticales homogènes sur plus de 220 stations, validé par des estimations géophysiques indépendantes ; 2) en utilisant ces vitesses, réévaluer la vitesse long terme de variation du niveau de la mer dans un référentiel absolu (donc comparable aux variations données par l'altimétrie sur 15 ans).
- l'étude de l'humidité atmosphérique dans le cycle de mousson en Afrique de l'Ouest. Durant la campagne AMMA, qui s'est déroulée principalement de 2005 à 2007 en Afrique de l'Ouest, nous avons mis en place un réseau de 6 stations GPS permanentes et un centre d'analyse de leurs données pour la production de Contenus Intégrés en Vapeur d'Eau atmosphérique. Des traitements automatiques en temps peu différé ont fourni, pendant toute la durée de la campagne, des indicateurs d'aide à la décision, avec des CIVE comparables aux prévisions et aux analyses. Le traitement scientifique, à l'état de l'art, met en évidence des biais importants des mesures « classiques » de radio sondages en Afrique, qui se répercutent ensuite sur les analyses. Il apporte des informations nouvelles sur les différentes étapes de la mousson (que l'on caractérise bien par l'évolution de la vapeur d'eau atmosphérique) et sur le cycle diurne et son évolution au cours du cycle de mousson.
- la géodésie de fond de mer. Les résultats ne concernent pour l'instant que la composante verticale. Sur une zone calme au Vanuatu, des tests sur un réseau de répétition montrent que la répétabilité sur la hauteur ellipsoïdale d'un repère installé par 16 m de fond est sub centimétrique. Le facteur limitant est la précision que l'on peut obtenir sur la mesure de hauteur par GPS en surface, évaluée grâce à une étude méthodologique à 10 à 15 cm sur la zone d'intérêt (fosse de subduction). On a obtenu, sur cette zone, une cartographie GPS de la surface moyenne océanique à même précision, qui met en évidence des biais importants dans les surfaces altimétriques et alti-gravimétriques au Vanuatu.

I Introduction

Le GPS occupe, depuis la fin du siècle dernier, une position singulière dans la communauté des sciences de la Terre. Au départ système de positionnement géodésique dont l'usage était a priori réservé aux géodésiens et militaires, il s'est retrouvé doté d'un rôle central dans plusieurs domaines : définition des systèmes de référence en géodésie, mesures de déformation en sismotectonique, étude du contenu intégré en vapeur d'eau dans la troposphère. Cette évolution, rapide, a été motivée par son utilisation de plus en plus simple et économique, et l'amélioration des précisions que l'on a pu obtenir grâce au travail d'une large communauté de géodésiens et géophysiciens, coordonnée par l'IGS. Plusieurs universités et services de recherche en géodésie spatiale, aux Etats Unis, en Europe, en Australie, travaillent à l'amélioration des modèles physiques qui accompagnent le traitement GPS : représentations troposphériques, modèles de comportement des centres de phase des antennes de réception et d'émission GPS, modèles ionosphériques. Les mêmes communautés, ou leurs voisines, travaillent à l'amélioration des algorithmes de traitement GPS, entre autres en permettant l'utilisation de ces nouveaux modèles au fur et à mesure de leur apparition. Cela, et la densification du réseau de référence de l'IGS débouche logiquement sur une amélioration de la précision des orbites de l'IGS. Le paradoxe, qui accompagne la progression des techniques de géodésie spatiale depuis leur origine, est que chaque gain de précision résulte en la découverte des effets de nouvelles sources d'erreur, qui de négligeables deviennent significatifs, et en de nouveaux efforts de la communauté pour les corriger. Ceci est particulièrement vrai pour l'utilisation de la composante verticale du GPS : cette composante, pour plusieurs raisons physiques simples, est la plus sensible aux erreurs d'orbites, aux effets de la traversée de la troposphère et de l'ionosphère par les signaux GPS, aux différences de matériel utilisé; mais aussi aux imprécisions de la définition du système de référence terrestre (ITRF si l'on utilise sa réalisation internationale).

Lorsque j'ai commencé ma recherche au LAREG il y a 10 ans, le GPS était considéré comme un outil, fort pratique et relativement précis, par une communauté de géophysiciens intéressés par la mesure de déformations essentiellement horizontales (géodynamique, sismo tectonique...). Leur préoccupation était d'obtenir des successions de positions de stations, par exemple tous les ans ou tous les 2 ans, accompagnées de barres d'erreur les plus petites possible, et d'en déduire droites ou segments de droites traduisant la déformation d'une région géodynamique. L'impression générale était que le GPS était un outil fort appréciable pour la mesure de déformations horizontales, mais trop imprécis pour les mouvements verticaux. A côté de cela, la communauté de géodésie spatiale conduisait les recherches méthodologiques évoquées plus haut avec beaucoup de succès mais peu d'applications en dehors de la géodésie proprement dite. La situation, heureusement, a beaucoup changé depuis : les deux communautés communiquent de plus en plus, il n'est actuellement plus possible de discriminer entre utilisateurs "aveugles" du GPS qui s'en serviraient sans recul ni précautions et géodésiens purs et durs qui traquent la diminution des variances sans s'intéresser aux usages de ce qu'ils développent. La communauté française des chercheurs en géophysique qui utilise le GPS est de plus en plus indissociable de celle qui le développe, l'améliore, et en invente de nouvelles applications. Chacun, quelles que soient les applications sur lesquelles il travaille, est conscient des possibilités mais aussi des limites (actuelles) de la technique GPS, et en maîtrise suffisamment les ressorts physiques et mathématiques pour accompagner ou initier ses progrès. J'ai eu la chance de pouvoir accompagner cette évolution, de par ma position au LAREG, où plusieurs chercheurs travaillaient et travaillent sur différentes composantes de

l'amélioration des techniques de géodésie spatiale. J'ai donc conduit, pendant ces dix ans, des travaux de méthodologie GPS, en lien étroit avec ses applications et la communauté française de sciences de la Terre : par intérêt, parce que la technique sans applications m'a toujours paru stérile, et aussi parce que je pense que ce sont les besoins qui motivent les progrès d'une technique. Je me suis intéressée à différentes thématiques scientifiques que je présente dans ce mémoire, et qui justifiaient chacune à leur manière l'amélioration de la composante verticale GPS, qui constitue le point central de mes travaux. La plus naturelle d'entre elles est la mesure de déformations verticales : géodynamique de zone de subduction, effets de charge, définition des références verticales (partie II). A l'amélioration de la précision sur la composante verticale répond non moins naturellement la correction et la mesure du retard troposphérique : de source d'erreur, l'humidité atmosphérique est passée au statut d'application. La mesure du contenu intégré par vapeur d'eau y a gagné ses lettres de noblesse et sert maintenant d'outil opérationnel et de référence, comme on le verra partie III. Enfin, je me suis intéressée aux débuts très prometteurs d'une évolution thématique : la mise au point d'une technique de géodésie fond de mer qui utilise le GPS même si on ne peut pas encore parler de prolongement, au vu des précisions atteintes (partie IV).

Mon originalité dans ces travaux, s'il faut absolument en trouver une, serait d'avoir cherché à réconcilier en permanence l'approche physique (dynamique, modèles physiques des différentes sources d'erreur) et l'approche mathématique de la géodésie spatiale. Mon intégration au LAREG m'a permis de prendre conscience de l'importance des systèmes de référence et de leur utilisation en analyse GPS. Je n'adhère pas à l'opinion qui veut que la principale source d'erreur, en GPS, soit la modélisation atmosphérique; pas plus que quelque autre effet physique mal modélisé. J'ai pu constater que le progrès des modèles, s'ils sont bien réels et importants, ne suffisent pas à réduire les 5 derniers millimètres sur les positions verticales (ou le mm/an sur les vitesses) sans une définition optimale du système de référence. J'en veux pour preuve les différences d'échelle et d'origine entre les deux dernières réalisations ITRF2000 et ITRF2005 (Altamimi *et al.*, 2002; Altamimi *et al.*, 2007a) et les conséquences sur les vitesses verticales, environ 0,5 mm/an, qui éclipsent ce qu'on a pu mettre en évidence comme effets systématiques dus à la troposphère. Je me suis attachée à tenir compte de ces deux sources d'inexactitude.

Je termine cette introduction par un avertissement : j'emploie plus volontiers, dans la suite de ce mémoire, le collectif "on" que le singulier "je". Ce n'est pas de la fausse modestie, mais plutôt la constatation que les initiatives que je décris se sont systématiquement conduites en collaboration, souvent en binôme. Il me paraît inutile, voire spécieux, de vouloir à tout prix séparer les rôles, et mes principaux partenaires, G. Wöppelmann pour les mouvements verticaux des marégraphes, O. Bock pour la mesure de l'humidité atmosphérique, V. Ballu pour la géodésie fond de mer savent que je ne m'attribue pas pour autant leurs travaux.

II Géodynamique et composante verticale

Le GPS est utilisé depuis plusieurs années pour observer les mouvements dans les zones de déformation active. On est passé de la simple description d'un champ de vitesse constant (par exemple Argus & Heflin, 1995 ; Walpersdorf *et al.*, 1998 ; Bouin & Vigny, 2000) à l'analyse fine de déformations continues, avec des périodes de charge intersismique, de déformation pré sismique, co sismique, et post sismique (Vigny *et al.*, 2005 ; Simons *et al.*, 2007 ; Barbot *et al.*, 2008). Un aboutissement récent de cette utilisation est le suivi des séismes lents (Szeliga *et al.*, 2008 ; Kao *et al.*, 2006). Pour autant, ce champ très large d'utilisations concerne principalement la composante horizontale. D'une part c'est horizontalement que l'essentiel des déformations et de leur variabilité temporelle se manifeste et peut être répertorié comme source de risques, d'autre part la technique GPS pour la mesure de déformations verticales est encore considérée comme imprécise voire suspecte. Ces dernières années pourtant, elle a été utilisée avec succès et ses résultats comparés à des modèles d'ajustements glacio-isostatiques (GIA, voir Johansson *et al.* 2002; Nocquet *et al.* 2005; Rülke *et al.* 2008); ou à des champs de vitesse dérivés de l'altimétrie et de la marégraphie combinées (Kuo *et al.* 2004).

Etudier le champ de déformation 3D d'une zone de déformation rapide ou documenter de manière précise un effet régional de rebond glaciaire ne font pas encore partie des processus standard de la géodésie spatiale. Les raisons en sont simples, et ont déjà été évoquées dans l'introduction : obtenir des suites de positions, donc des vitesses ou déformations sur la composante verticale, nécessite plus de précautions qu'en planimétrie. La couverture zénithale des satellites sera toujours plus réduite que leur répartition en azimut. Leur dynamique, contrôlée par le champ de gravité de la Terre, présentera des irrégularités plus difficiles à modéliser sur la composante radiale, qui se reporteront sur la composante verticale du positionnement. La traversée de l'atmosphère, ionosphère et troposphère se faisant essentiellement selon la composante verticale, apportera son retard, plus ou moins bien modélisé et corrigé. Le comportement du signal GPS aux abords immédiats de l'antenne de réception (multitrajets, position apparente du centre de phase) ajoutera des erreurs supplémentaires toujours principalement sur la verticale. Enfin, le point de la croûte terrestre sur lequel se fait la mesure n'est jamais immobile pendant la durée, de quelques heures au moins, de la session de mesure. Ces déplacements, significatifs par rapport à la précision de la mesure, doivent être modélisés et corrigés. Ils sont dus à des effets de charge (marées terrestres, surcharge océanique, une partie de la surcharge atmosphérique) et concernent aussi principalement la composante verticale. Tous ces effets sont ceux qui interviennent directement dans l'inversion GPS (passage des observations, autrement dit ce qui est enregistré par le récepteur GPS, à un résultat, soit la position d'un ou plusieurs points dans un système de référence quelconque, généralement mal défini). Ils doivent à ce titre être modélisés ou estimés, puis corrigés par le logiciel scientifique de calcul GPS. Les progrès dans leur prise en compte, depuis 10 ans, ont été conséquents et l'objet des recherches d'une large communauté d'utilisateurs-développeurs du GPS, recherches animées et coordonnées par l'IGS (Dow *et al.*, 2005).

On développera le contexte des recherches sur l'amélioration de la modélisation de la troposphère dans la partie consacrée à la vapeur d'eau atmosphérique. Il s'agit d'un domaine de progrès important, et les travaux de la communauté associée, dans les derniers 10 ans, ont permis de passer d'un modèle simple de fonction de projection avec dépendance en latitude et périodicité annuelle (Niell Mapping Function ou NMF, Niell 1996) à une fonction

directement calquée sur les champs de pression, température, humidité du CEPMMT (ou ECMWF, Vienna Mapping Function ou VMF, Boehn *et al.*, 2006a); Voir aussi Global Mapping Function (GMF, Boehm *et al.*, 2006b) et Isobaric Mapping Function (IMF, Niell 2005). L'usage de l'estimation des gradients atmosphériques s'est répandu dans le même temps (Walpersdorf *et al.*, 2004 ; Brenot *et al.*, 2006).

Le rôle de l'ionosphère comme source d'erreur dans des conditions "normales" d'utilisation (i.e. en dehors de la ceinture équatoriale magnétique et des périodes d'orages magnétiques) a été longtemps minimisé. L'utilisation de la combinaison "iono free" des deux fréquences L1 et L2 permet d'éliminer le premier ordre des effets ionosphériques. Des travaux récents ont montré que les ordres supérieurs produisent des effets significatifs (Kedar *et al.*, 2003; Fritsche *et al.*, 2005; Hernandez-Pajares *et al.*, 2007; Hoque & Jakowski, 2006) sur l'origine des orbites calculées, et donc sur l'origine du système de référence du calcul. Les corrections correspondantes (l'utilisation d'un modèle du champ magnétique terrestre pour estimer le contenu électronique intégré le long d'une trajectoire de signal GPS, et corriger directement le retard provoqué) ne font pas encore partie des modèles standard des logiciels scientifiques GPS mais devraient être disponibles avec la prochaine édition de GAMIT (King & Bock, 2006).

L'impact de l'environnement immédiat de l'antenne de réception GPS sur les observations et, au final, sur la position apparente de l'antenne a été mis en lumière et décrit précisément ces dernières années (Ray *et al.* 2005). On sait par exemple que les multitrajets, qui résultent en un changement de hauteur apparent du point GPS, peuvent trouver leur origine non seulement dans le support d'antenne (pilier béton, toit) mais dans son environnement jusqu'à quelques dizaines de m : végétation qui change à l'échelle de la saison (Bilich *et al.*, 2004), couverture neigeuse sur ou autour de l'antenne (Ray *et al.*, 2005). Le résultat sur la position n'est plus seulement un biais, mais un signal périodique annuel.

Le support d'antenne lui même est depuis longtemps soupçonné de générer du bruit autocorrélé dans les séries temporelles de positions GPS (Zhang *et al.*, 1997). Pourtant, des conclusions définitives sur le type de support à privilégier, de ce point de vue, manquent encore. Beavan (2005) ne discrimine pas encore les supports de type pilier en béton et mât métallique. Par contre, l'influence du comportement électronique du matériel, des variations de centre de phase des antennes en particulier, commence à être bien connue : de nombreuses campagnes d'étalonnage des antennes de réception GPS à l'aide de dispositifs variés, coordonnées par l'Unavco (Mader, Unavco 1995-2005) ont permis de mettre en évidence des effets de plusieurs mm sur la position apparente du centre d'antenne. On en mesure l'importance lors d'utilisations en campagnes de mesure avec du matériel divers, ou lors de changement de matériel sur un site permanent. On dispose maintenant de cartographies "absolues" de variations de centre de phase en azimut et élévation pour la plupart des antennes utilisées dans le cadre de l'IGS, ce qui a d'ailleurs motivé la campagne de réanalyse de l'IGS qui se termine actuellement (Ray, 2008, IGSmail 5873). Les comportements des antennes d'émission ont fait l'objet de la même attention, il a été montré que l'inexactitude de leur modélisation était à l'origine d'une variation du facteur d'échelle du GPS par rapport à l'échelle de l'ITRF (Ge *et al.*, 2005).

Ces effets (modélisation ou correction imparfaite du comportement des signaux GPS) sont à ranger dans ceux qui dépendent de l'angle de coupure en élévation que l'on utilise dans l'estimation GPS : ils dépendent tous de l'élévation du signal, et on sait qu'ils augmentent quand l'élévation diminue. Aux basses élévations, la couche d'atmosphère traversée par le

signal est plus importante et le retard qui ne sera pas ou mal corrigé le sera aussi. Aux basses élévations, la probabilité de multitrajets est plus forte, et leur caractérisation comme tels plus difficile. Aux basses élévations, les modèles de comportement de centre de phase d'antenne sont moins fiables. La tentation est grande alors d'exclure les observations avec un angle d'élévation inférieur à 15 ou 20°; mais le raffinement des modèles implique l'estimation de plus de paramètres, et la fiabilité de l'inversion par moindres carrés requiert de garder le plus d'observations possible. Il faut trouver un compromis. Les tests dits du “cut off” (comparer les résultats de calculs identiques avec des angles de coupure en élévation variant de manière systématique) permettent parfois de faire choix, presque toujours de mesurer l'impact des défauts de modélisation ou de description sur les résultats : plusieurs mm/an sur des vitesses verticales long terme par exemple (Morken *et al.*, 2004). Il s'agit d'un des outils que l'on a utilisés au cours des études méthodologiques présentées ici.

D'autres effets ne sont pas discernables avec la variation de l'angle de coupure en élévation, mais ont un impact important sur la position et la vitesse verticale d'une station : des effets géophysiques liés à l'action du champ de pesanteur terrestre, et comme tels regroupés dans la catégorie “effets de charge” modifient la hauteur de la station et doivent être pris en compte dans le traitement. Les marées terrestre ne font pas l'objet de polémiques dans la mesure où leur effet bien que largement supérieur à la précision du GPS, est facile à modéliser précisément. Elles sont systématiquement corrigées selon les recommandations de l'IERS (McCarthy & Petit 2004). La surcharge océanique, grâce à l'apport de l'altimétrie spatiale, est généralement bien modélisée (Lyard *et al.*, 2006). Sa période principale étant proche de 12h, un calcul en sessions de 24h en fait disparaître les effets au premier ordre. On sait pourtant que ces fréquences provoquent, par l'effet de repliement de spectres, des signaux à plus longues périodes dans les séries temporelles GPS (Penna *et al.*, 2007; King *et al.*, 2008). L'admittance (rapport entre les amplitudes du signal résultant basse fréquence et du signal haute fréquence d'origine) peut dépasser 1, il est donc critique que la précision des modèles utilisés soit égale à celle des signaux que l'on cherche à détecter dans les séries temporelles GPS.

La même constatation vaut pour la surcharge atmosphérique (Tregoning & VanDam, 2005; VanDam & Tregoning., 2005) à ceci près qu'il est difficile de corriger la partie haute fréquence du signal sans la composante basse fréquence (période de plusieurs jours) qu'il n'est par contre pas souhaitable de corriger. Les logiciels GPS ne proposent pas, pour l'instant, de correction sélective des effets haute fréquence seuls. Les recommandations de l'IGS consistent à ne pas utiliser de correction de la surcharge atmosphérique, quitte à être conscient de la présence possible de signaux parasites dans les séries temporelles.

Une fois intégrés l'ensemble de ces effets (dits “physiques”) sous forme de modélisation ou correction dans les logiciels, on arrive généralement à l'estimation de positions pour un ensemble de stations, à une époque donnée, avec des barres d'erreur de quelques mm y compris sur la composante verticale. La question qui se pose alors est de savoir dans quelle mesure ces barres d'erreurs sont représentatives d'une réalité physique : refaire la même inversion, sur les mêmes stations, avec les mêmes modèles, à une autre époque, donnera-t-il les mêmes résultats, à ces barres d'erreur près ? Cette notion de répétabilité (ou répétitivité), donc de précision de la technique GPS, implique celle de comparaison de jeux de données, d'une époque à l'autre (ce que l'on fait souvent sous forme de séries temporelles) ou d'un type de calcul à l'autre. Pour être comparables, les jeux de données doivent être exprimés dans le même système de référence : si on travaille sur des jeux de données globales, on adoptera une réalisation de l'ITRF, par exemple l'ITRF2005 (Altamimi *et al.*, 2007a). L'étape de mise en

référence, en traitement GPS, intervient généralement indépendamment et en aval de l'inversion GPS proprement dite : autre logiciel, parfois autre technique. Ainsi, les positions en sortie du calcul GPS proprement dit sont exprimées dans un système de référence indéfini (relativement proche de celui des orbites et des positions a priori de stations) et qui n'est pas nécessairement le même d'une époque de calcul à l'autre. Sa variabilité d'une époque à l'autre peut être estimée avec une comparaison des positions de stations en sortie de calcul. Pour pouvoir comparer des positions de stations successives, ou obtenues par des analyses différentes, il convient d'exprimer les jeux de coordonnées dans un système de référence unique, et si possible bien défini. C'est l'étape de mise en référence déjà évoquée, qui peut se faire par la combinaison, avec estimation de 7 paramètres de transformation, des différentes solutions exprimées dans le système de référence choisi (ITRF2005). La combinaison en question peut se faire à partir des positions de stations communes, des paramètres d'orientation de la Terre, des paramètres orbitaux estimés dans l'inversion GPS. Dans tous les cas, sa robustesse dépendra de la géométrie du réseau GPS utilisé, de son étendue et de la régularité de son maillage. La précision (il ne s'agit pas d'exactitude, puisqu'on est à l'intérieur de la technique GPS) d'un positionnement, vertical en particulier, dépendra donc non seulement du soin que l'on a apporté à l'inversion GPS proprement dite (choix des modèles, des observations) mais aussi de la qualité de la mise en référence des jeux de coordonnées obtenus. Plusieurs collègues ont été étonnés, suite à la publication de l'ITRF2005, de constater que des champs de vitesse identiques, exprimés dans la réalisation précédente ITRF2000 puis dans l'ITRF2005 avaient varié au delà de leurs barres d'erreur. Il y a, entre l'ITRF2000 et l'ITRF2005, des paramètres de transformation non nuls (voir http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php) qui se traduisent par exemple par une variation du facteur d'échelle de 0,5 mm/an, et une différence de translation selon Z de 1,8 mm/an (Collilieux *et al.*, 2009; Collilieux et Wöppelmann, 2009). Ces différences vont se traduire par une différence sur les champs de vitesse, avec un facteur d'admittance qui dépend du réseau considéré. On touche ici du doigt la notion d'exactitude : celle de tout résultat GPS sera de toute façon conditionnée par celle du système de référence sous-jacent.

L'ensemble de ces limitations en tête, on s'est attaché, durant ces recherches, à obtenir les meilleurs champs de vitesse possible dans quelques domaines d'application. Le logiciel utilisé pour le traitement GPS est celui du MIT, GAMIT (King & Bock, 2006), qui présente le double avantage d'être libre d'accès pour la communauté scientifique et d'intégrer extrêmement rapidement (nouvelle édition tous les 6 mois en moyenne) les nouvelles modélisations disponibles. La mise en référence a été effectuée avec le logiciel CATREF (Altamimi *et al.*, 2007b) développé au LAREG et utilisé pour la combinaison des jeux de coordonnées de l'ITRF.

II-1 Zone de déformation rapide et composante verticale.

Contexte

La zone de subduction du Vanuatu constitue un bon laboratoire pour la méthodologie de la mesure de déformation rapide, entre autres sur la composante verticale. La plaque Australienne plonge sous le bassin Nord Fidjien avec une vitesse moyenne de 10 cm/an. Différents ridges et reliefs présents sur la plaque plongeante entrent en contact avec l'arc, engendrant la segmentation de la zone et la variation de la vitesse de convergence de 5 à 17 cm/an, (Calmant *et al.*, 2003).

Ces vitesses horizontales très rapides sont à l'origine d'une activité sismique très importante (par exemple $M_w=7.2$, Mallicolo, 1994, $M_w=7.5$, Ambrym, 1999, $M_w=6.9$, Santo, 2000, $M_w=7.2$, Efate, 2002) et de déformation verticale intense. Cette zone a fait l'objet de l'implantation d'un réseau GPS matérialisé par l'équipe IRD de Nouméa, dès 1990, réseau complété en 1997 et mesuré de manière fréquente et régulière. Il se compose actuellement d'une cinquantaine de points sur l'ensemble de la zone, dont plus d'une vingtaine sur les îles situées à l'Est de la DER, autour du bassin d'Aoba (voir Figure 1). Les déplacements géodésiques obtenus grâce à ce réseau ont permis de préciser les conditions aux limites pour les déformations locales, avec une nouvelle détermination des pôles de rotation des plaques Australienne et Pacifique par exemple. Ils donnent une très bonne image des déformations horizontales sur la zone, mais ne concluent pas quant aux mouvements verticaux (Calmant *et al.*, 2003). Le modèle de déformation par rapport au bassin Nord-Fidgien découpe alors la zone située le long de la fosse en 4 segments. Si l'on excepte la partie située au Sud de 21°S , la rotation de deux blocs recouvrant les 3 segments les plus au Nord permet de rendre compte d'une grande partie de la déformation. La partie Nord de la zone tourne dans le sens anti-horaire, la partie sud dans le sens horaire. Les résidus des vitesses par rapport à ce modèle à deux rotations restent importants (jusqu'à 20 mm/an). Ils sont particulièrement importants et cohérents sur les pourtours du bassin arrière-arc, et reflètent probablement l'accumulation de contraintes sismiques sur cette zone. Ce champ de vitesse contrasté reflète bien les limites des chantiers GPS réalisés à partir de points matérialisés, et l'apport potentiel de stations permanentes.

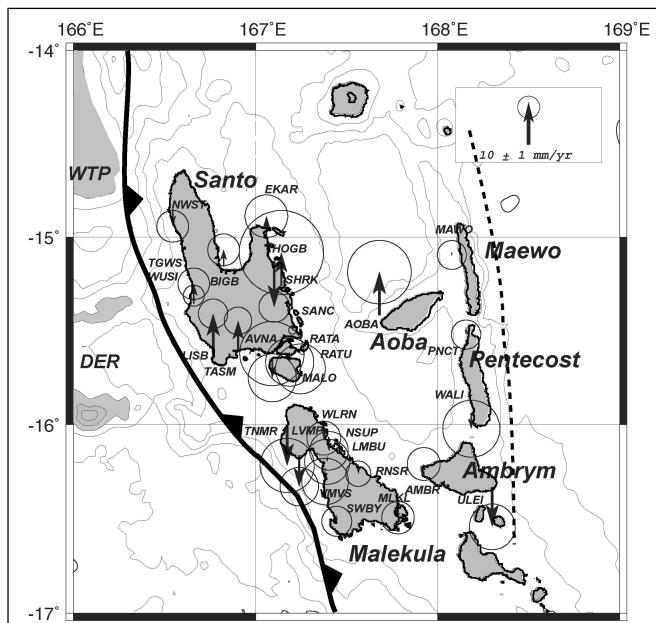


Figure 1 : Carte des vitesses verticales sur la partie centrale de l'arc du Vanuatu.. DER figure la ride d'Entrecasteaux, WTP le plateau Ouest Torres (Bergeot *et al.* 2009)

Les travaux de thèse de Nicolas Bergeot (2003-2007), que j'ai encadrés avec Michel Diament (IPGP), ont pris la suite de ce chantier géodésique important avec comme objectifs une meilleure description du champ de vitesse horizontal et la détermination de la déformation verticale. Cela s'est traduit par plusieurs campagnes de terrain (2004, 2005, 2006) au cours desquelles 26 stations du réseau ont remesurées sur les îles de Santo, Malo, Mallicolo, Pentecôte, Ambrym, Epi, Tongoa, selon le protocole précédemment utilisé par l'IRD (mâts à centrage forcé, au moins 3 sessions de 24 h par site). On a bénéficié, au cours de ces missions, de l'aide précieuse de l'IRD Nouméa et du Service Topo du Vanuatu de Port Vila et Luganville. L'ensemble des données GPS acquises par l'IRD depuis 1992 ainsi que les données acquises à l'occasion de ces campagnes ont été traitées de manière homogène avec le logiciel GAMIT 10.2 (King & Bock, 2006) dans un réseau mondial d'une trentaine de stations extraites des stations de référence de l'IGS (Ferland, 2005) afin de permettre une définition optimale du système de référence. Ces travaux ont permis d'améliorer l'image des

Résultats

Les travaux de thèse de Nicolas Bergeot (2003-2007), que j'ai encadrés avec Michel Diament (IPGP), ont pris la suite de ce chantier géodésique important avec comme objectifs une meilleure description du champ de vitesse horizontal et la détermination de la déformation verticale. Cela s'est traduit par plusieurs campagnes de terrain (2004, 2005, 2006) au cours desquelles 26 stations du réseau ont remesurées sur les îles de Santo, Malo, Mallicolo, Pentecôte, Ambrym, Epi, Tongoa, selon le protocole précédemment utilisé par l'IRD (mâts à centrage forcé, au moins 3 sessions de 24 h par site). On a bénéficié, au cours de ces missions, de l'aide précieuse de l'IRD Nouméa et du Service Topo du Vanuatu de Port Vila et Luganville. L'ensemble des données GPS acquises par l'IRD depuis 1992 ainsi que les données acquises à l'occasion de ces campagnes ont été traitées de manière homogène avec le logiciel GAMIT 10.2 (King & Bock, 2006) dans un réseau mondial d'une trentaine de stations extraites des stations de référence de l'IGS (Ferland, 2005) afin de permettre une définition optimale du système de référence. Ces travaux ont permis d'améliorer l'image des

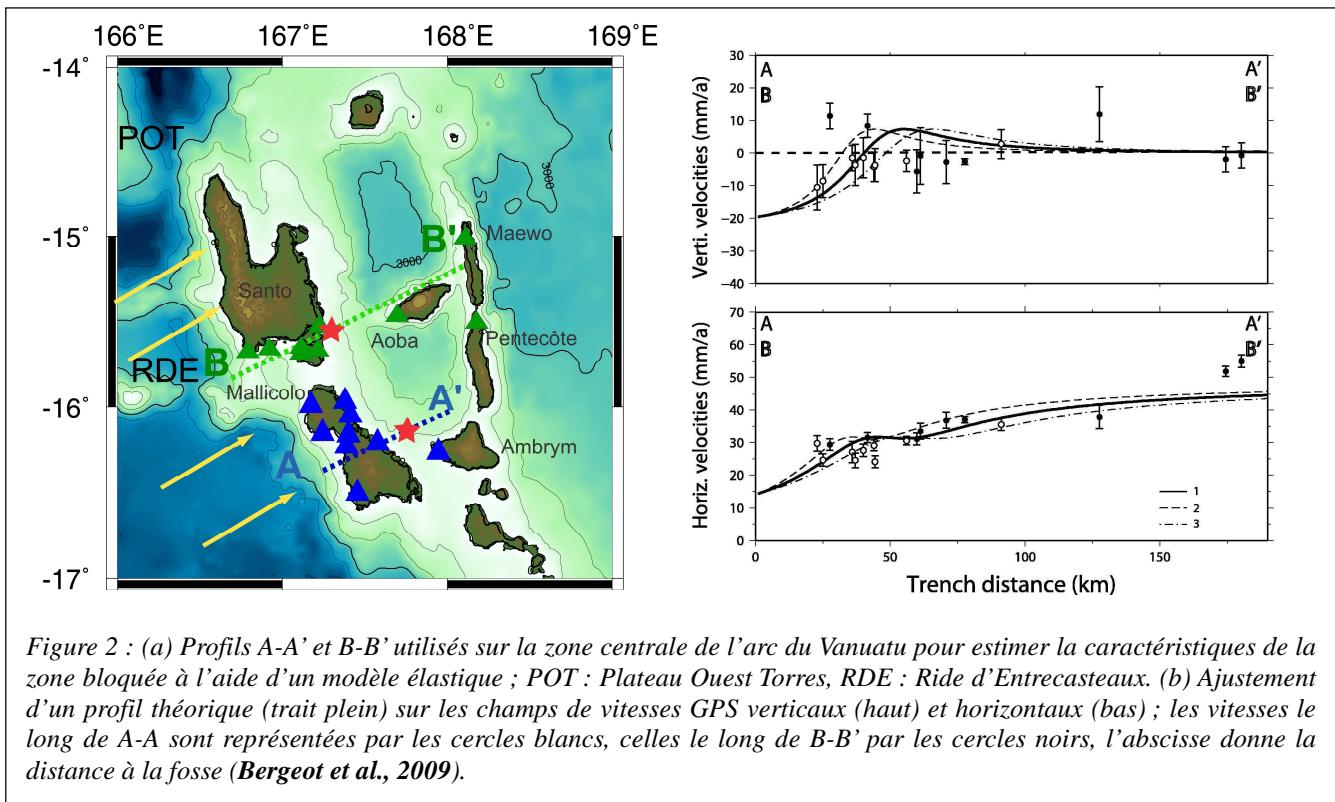


Figure 2 : (a) Profils A-A' et B-B' utilisés sur la zone centrale de l'arc du Vanuatu pour estimer la caractéristiques de la zone bloquée à l'aide d'un modèle élastique ; POT : Plateau Ouest Torres, RDE : Ride d'Entrecasteaux. (b) Ajustement d'un profil théorique (trait plein) sur les champs de vitesses GPS verticaux (haut) et horizontaux (bas) ; les vitesses le long de A-A' sont représentées par les cercles blancs, celles le long de B-B' par les cercles noirs, l'abscisse donne la distance à la fosse (Bergeot *et al.*, 2009).

déformations horizontales (en particulier les résidus par rapport aux vitesses de plaques, sur le bassin d'Aoba), de re estimer les déplacements co sismiques associés aux séismes de Ambrym, 1999 et Santo, 2000, et surtout d'obtenir un champ de vitesses verticales sur le bassin d'Aoba. Cela montre que, si l'ensemble de Mallicolo, Malo et le sud Santo est en légère subsidence assez homogène (-1 à -10 mm/an), le tableau est plus contrasté sur Santo, avec des sites en subsidence mais aussi des stations proches de la fosse de subduction affichant des surrections de 2 à 11 mm/an (Bergeot *et al.*, 2009).

A partir de ce champ de vitesse et en utilisant un modèle élastique du type (Savage, 1983), adapté par Singh et Rani (1993), on a cherché à estimer quelles étaient les caractéristiques de la zone bloquée correspondant à ce champ de déformations (on utilise alors non seulement les vitesses verticales mais les vitesses résiduelles horizontales). On se place le long de 2 profils A-A' et B-B' transversaux à la fosse de subduction (Figure 2a) et on ajuste le profil théorique des vitesses par rapport au champ de vitesses observé. Le long du premier profil, les vitesses GPS vont jusqu'à 40 km de la fosse, le long du second jusqu'à 25 km, en face de la Ride d'Entrecasteaux engagée dans la subduction. Les limites des paramètres à estimer (soit de 45 à 70 mm/an pour la vitesse de convergence long terme, 20 à 30° pour le pendage de la zone bloquée, et de 40 à 80 km pour sa longueur) sont données par les résultats GPS et les données de sismicité récentes sur la zone. On obtient alors une vitesse de convergence de 54 mm/an, un pendage de 25° et une longueur de 50 km (Figure 2b). Alors que l'ajustement est bon aussi bien pour les vitesses résiduelles horizontales que pour les vitesses verticales le long du profil A-A' (différences de $3,5 \pm 4,3$ mm/an et $3,9 \pm 5,0$ mm/an respectivement) il l'est beaucoup moins pour le profil B-B' ($3,7 \pm 5,0$ mm/an pour les vitesses résiduelles horizontales, mais $8,6 \pm 10,4$ mm/an pour les vitesses verticales). Aux points les plus proches de la fosse en particulier, on observe une surrection marquée et homogène alors que le modèle prédit de la subsidence. Cela s'explique vraisemblablement par la présence de la Ride d'Entrecasteaux dans la subduction, qui est à l'origine de déformation inélastique en failles normales, et probablement de la topographie escarpée observable sur l'Ouest de Santo. Les modèles du type Savage ne prennent en compte que de la déformation purement élastique, sans mise en place de topographie. Une analyse plus approfondie de la zone de blocage devrait faire appel

à un modèle permettant de prendre en compte la présence de la Ride et son effet sur la déformation verticale.

Perspectives

A la suite de ces travaux, le financement d'un projet de volcanologie, géodésie, tectonique et sismologie a été obtenu sur l'appel d'offres ANR-CATELL (coordination B. Pelletier). Le volet géodésie a permis l'affectation de V. Ballu (CNRS/IPGP) à l'IRD (Géosciences Azur) pour une mission de 2 ans 1/2 à Port Vila, débutant en décembre 2007. Les travaux de N. Bergeot ont montré l'intérêt qu'il y a à obtenir un champ de vitesse dense et homogène sur l'ensemble du Vanuatu et la zone centrale en particulier, mais aussi les limites (particulièrement pour l'étude des déformations verticales) d'un fonctionnement en campagnes de mesures : plusieurs stations, pourtant mesurées régulièrement, donnent des résultats incomplets car elles sont affectées de nombreux déplacements cosismiques. Avec V. Ballu, nous avons défini un réseau permanent à équiper prioritairement (8 sites permanents fonctionnent actuellement de manière satisfaisante, Figure 3), ainsi

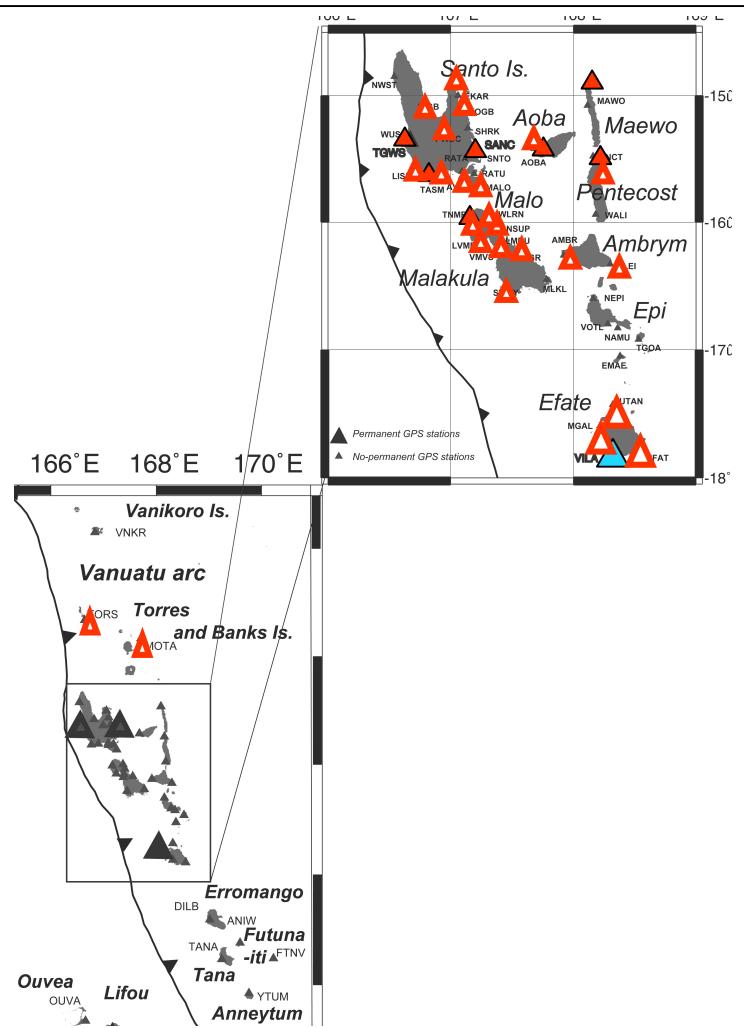


Figure 3 : Carte du réseau matérialisé (rouge et blanc) remesuré en 2008/2009, des stations permanentes (rouge) nouvellement installées, et de la station de Port Vila (bleu) qui existait.

qu'un planning de campagnes de remesures de l'ensemble du réseau matérialisé. Certains sites, installés sur des îles mal desservies, n'avaient pas été mesurés depuis 1999 et l'ont été à l'occasion de campagnes en mer de l'Alis (IRD Nouméa/Génavir). Le progrès des modèles, des logiciels GPS et des systèmes de référence depuis les résultats de N. Bergeot justifie un nouveau traitement de l'ensemble des données de campagnes et des stations permanentes, qui a été initié sur un centre de traitement à Port Vila. Cinq années ont déjà été calculées, cinq autres sont en cours. Le résultat du traitement complet doit lever des incertitudes sur la déformation du bloc Nord du Vanuatu, et améliorer l'image du cycle sismique. Une coopération a été initiée avec le DGMWR (Service Géologie et Mines) et le Service Topo du Vanuatu, elle se traduit notamment par de l'échange de matériel, de la coopération sur le terrain, et de la formation sur le traitement GPS et les systèmes de référence. Par exemple, un réseau local a été mis en place sur le site du volcan d'Ambrym suite à la reprise de son activité, pour le suivi de sa déformation de manière permanente ou semi-permanente. Ce volet

d'étude du cycle sismique sur cette zone de déformation rapide est complété par un volet de géodésie fond de mer (voir partie IV).

II-2 Variation à long terme du niveau de la mer.

Contexte

Les variations séculaires du niveau de la mer font l'objet d'un intérêt croissant depuis les premiers résultats de l'altimétrie spatiale. Pour la première fois, on a pu obtenir directement les variations de la hauteur de l'eau de manière globale, et dans un référentiel géocentrique et non plus par rapport au support du marégraphe. Les premières comparaisons entre ces nouvelles données, sur 15 ans, et les chiffres donnés sur le long terme par les enregistrements historiques des marégraphes ont laissé suspecter une accélération récente et sensible de la

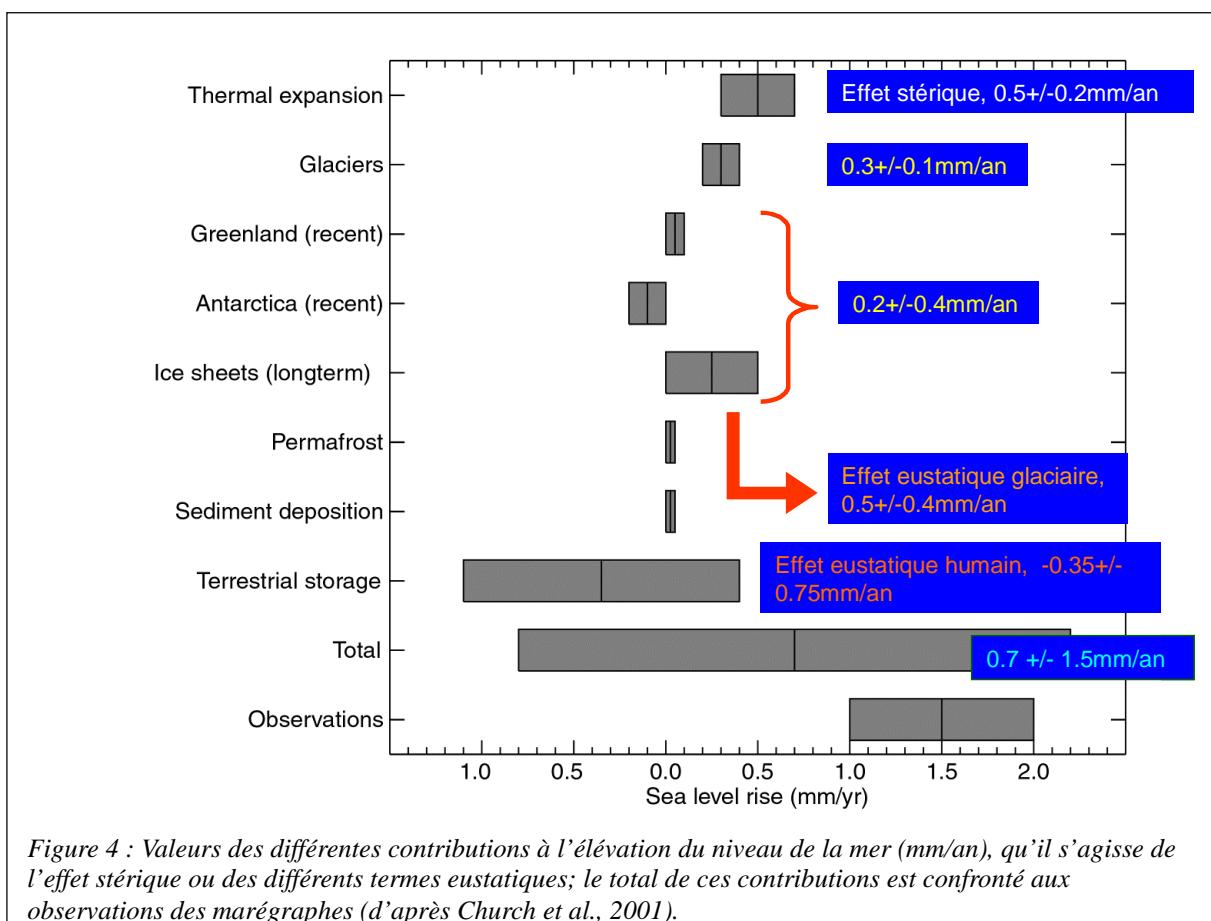


Figure 4 : Valeurs des différentes contributions à l'élévation du niveau de la mer (mm/an), qu'il s'agisse de l'effet stérique ou des différents termes eustatiques; le total de ces contributions est confronté aux observations des marégraphes (d'après Church et al., 2001).

montée du niveau de la mer (Cazenave *et al.*, 2001 ; Church & White, 2006). Une fois pris en compte les différents biais et dérives des altimètres et les possibles variations interdécennales, elle semble beaucoup moins certaine : il apparaît surtout que les séries altimétriques sont encore trop courtes pour déceler une tendance, encore moins une accélération (Douglas, 2001 ; Cazenave & Nerem, 2004). Les marégraphes restent donc, pour quelques décennies encore, le seul instrument capable de renseigner sur les tendances à long terme du niveau de la mer, à condition de pouvoir corriger les variations relatives qu'ils mesurent du mouvement de leur support. L'enjeu est crucial, en contexte de changement climatique, d'incertitude sur ses conséquences à court terme, et de pression sociétale importante sur les zones littorales.

Le projet TIGA (Tide Gauges Monitoring Project) a été initié dès 2002 par l'IGS et vise à fournir de la manière la plus globale possible une image des déplacements verticaux affectant les supports des marégraphes par le biais de stations GPS permanentes. Un consortium

constitué de l'Université de La Rochelle (LIENSS) du LAREG et de l'ENSG y participe depuis 2002 par le biais de la mise en place et de la maintenance d'un centre de données global, et d'un centre d'analyse global. Ce centre d'analyse est jusqu'à présent le seul centre global à disposer d'une stratégie qui lui est propre et à inclure plus de 90 sites permanents qui n'appartiennent pas au réseau IGS. La stratégie de calcul a été inspirée par celles de plusieurs centres IGS et de nombreuses discussions avec les acteurs de la communauté géodésique; elle a évolué au cours du temps en fonction des progrès des modèles et des logiciels GAMIT et CATREF, mais aussi de la montée en puissance du réseau (de 90 à plus de 220 stations traitées chaque jour, sur la période 1997-2007), voir (**Wöppelmann et al. 2007 ; 2009**) pour la description et l'évolution des paramètres de traitement. Cette stratégie correspond actuellement à un réseau de 227 stations permanentes, 86 d'entre elles faisant partie du réseau de référence de l'IGS, et 160 étant colocalisées (à moins de 15 km) d'un marégraphe du PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level). Ce réseau global est découpé pour le calcul en 5 sous réseaux globaux, dont les jeux de coordonnées, orbites et EOP sont ensuite combinés en solution journalières, elles-mêmes combinées en solutions hebdomadaires qui sont transmises de manière régulière au centre de coordination TIGA. La mise en référence se fait, depuis 2008, dans l'ITRF2005. L'ensemble de la procédure est très largement automatisé (seule la phase de nettoyage des points aberrants dans les fichiers de solutions individuelles ne l'est pas). Cet effort de mise en place et de maintenance à l'état de l'art, soutenu par des demandes de financement régulières et l'évolution des moyens de calculs, a permis d'obtenir des résultats à la fois sur la correction des variations du niveau de la mer et sur l'estimation d'un champ de vitesses verticales global.

Résultats

Nous nous sommes dans un premier temps intéressés à ce que Munk (2002) avait pointé comme un paradoxe : si les estimations globales de la montée du niveau de la mer sur le long terme sont à peu près convergentes vers une valeur de $1,5 \pm 0,5$ mm/an (Bindoff *et al.*, 2007),

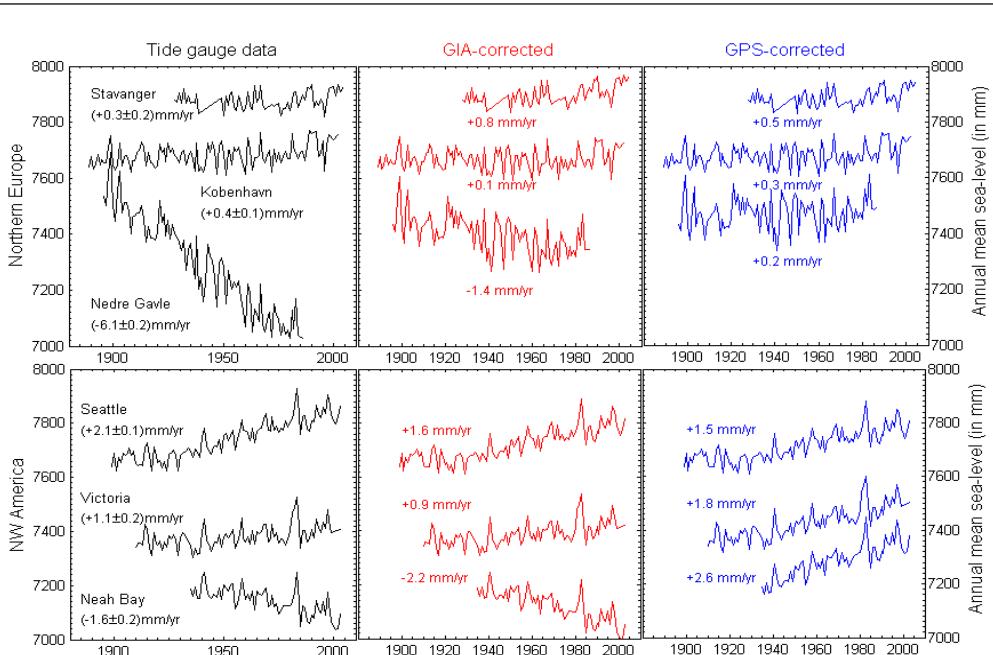


Figure 5 : Exemple de séries temporelles et tendances marégraphiques brutes (noir), corrigées avec un modèle d'ajustement isostatique (rouge) et corrigées des vitesses GPS (bleu), pour le Nord de l'Europe (haut) et le Nord-Ouest de l'Amérique du Nord (bas) ; l'utilisation des vitesses GPS améliore la cohérence régionale des tendances (**Wöppelmann et al., 2007**).

cette valeur ne correspond pas à la somme des contributions physiques (Figure 4), de $0,7 \pm 1,5$ mm/an. Un premier exercice a consisté à reprendre l'ensemble des stations marégraphiques (dotées de séries longues et de bonne qualité) que Douglas (1991; 1997; 2001) avait utilisées dans son estimation d'une tendance du niveau de la mer de $1,84 \pm 0,35$ mm/an après correction des effets de l'ajustement glacio-isostatique d'après le modèle de Peltier et Tushingham (1989). Il s'agit de stations présentant des séries de 60 ans ou plus, groupées par régions géographiques, auxquelles nous ajoutons la contrainte supplémentaire d'une colocalisation à moins de 20 km avec une station GPS du réseau TIGA. Seules les séries GPS de plus de 2,5 ans ont été retenues, pour éviter aux vitesses d'être biaisées par d'éventuels effets saisonniers (Blewitt & Lavallée, 2002), ce qui donne un ensemble de 28 stations. Un premier résultat (**Wöppelmann et al. 2007**) montre que les tendances des marégraphes corrigées des mouvements mesurés par le GPS sur la période 1999-2005,7 sont moins dispersées à l'échelle mondiale (dispersion 1,34 mm/an) que corrigées par le modèle d'ajustement glacio isostatique (1,49 mm/an). La tendance elle même change avec $1,31 \pm 0,30$ mm/an, pour se rapprocher de la somme des contributions listée par (Church *et al.*, 2001). Plus important, des disparités observées entre les tendances marégraphiques à l'intérieur d'une même région sont réduites ou disparaissent une fois les séries corrigées des mouvements GPS (voir Figure 5 pour une illustration). La conclusion, fort encourageante, de

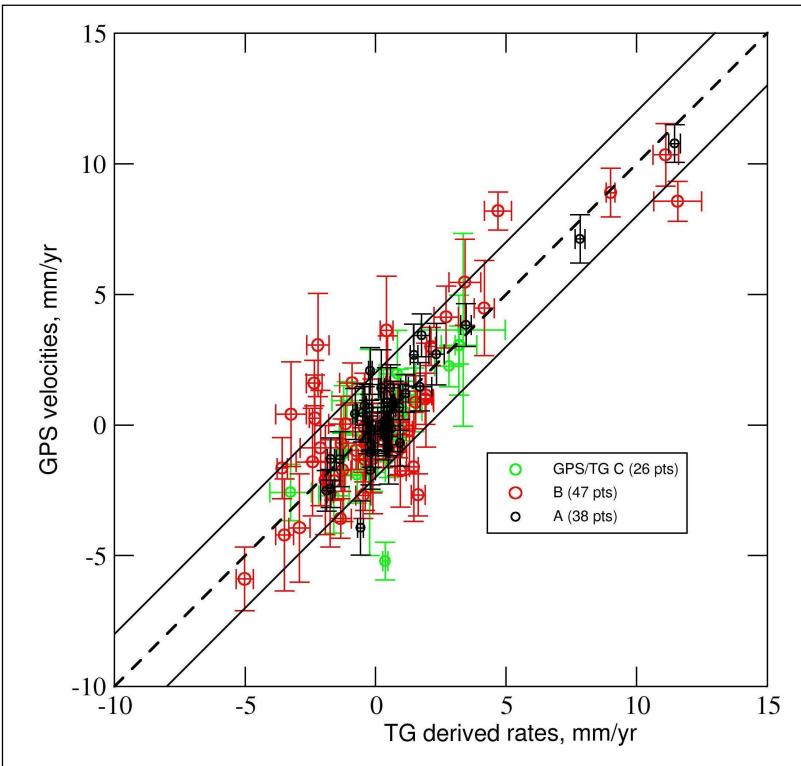


Figure 6 : Comparaison des vitesses GPS TIGA (ordonnées, mm/an) avec les vitesses marégraphiques (abscisses) sur un ensemble de 111 stations classées par catégorie. Les paires de stations du groupe A sont les meilleures, celles du groupe C les moins bonnes (Bouin & Wöppelmann, 2009)

cette étude, était que le GPS est capable de fournir une image des vitesses verticales des supports des marégraphes plus exacte que les modèles de rebond glaciaire, et améliore donc l'estimation de la montée moyenne du niveau de la mer dans un référentiel absolu. Depuis, la stratégie d'estimation GPS de l'analyse TIGA a évolué, incluant par exemple l'usage de la fonction de projection VMF (Boehm *et al.*, 2006) et la mise en référence dans l'ITRF2005 (Altamimi *et al.*, 2007a). Les séries temporelles GPS couvrent alors la période 1997-2006,9, et les incertitudes des vitesses verticales ont été estimées avec le logiciel CATS (Williams *et al.*, 2004) afin de tenir compte des processus auto corrélés dans les séries.

Les niveaux de bruit moyens sont de $2,6 \pm 0,4$ mm et $8,2 \pm 1,0$ mm/an $^{1/4}$ pour le bruit blanc et corrélé respectivement, correspondant à des incertitudes comprises entre 0,72 et 3,95 mm/an. Pour 176 stations sur les 227 présentant des séries temporelles de 5 ans au moins, l'incertitude moyenne est de $0,89 \pm 0,2$ mm/an. La tendance moyenne du niveau de la mer, sur les 28 stations déjà utilisées par (**Wöppelmann et al., 2007**), donne cette fois une valeur de $1,61 \pm 0,19$ mm/an (à condition d'exclure Fernandina, qui s'est révélée être une erreur

d'association). La dispersion des variations absolues du niveau de la mer est réduite une fois de plus, passant à 1,15 mm/an ou 0,98 sans Fernandina (**Wöppelmann et al., 2009**).

Indépendamment de l'amélioration apportée à l'estimation de la variation du niveau de la mer sur le long terme, l'obtention d'un champ de vitesses verticales homogène sur un réseau global comprenant autant de stations non IGS (160) constitue une première. Ce champ de vitesse a été comparé, pour validation et évaluation, à deux ensembles de données géophysiques extérieurs à la géodésie spatiale (**Bouin & Wöppelmann, 2009**) : 1) ce que Nerem (1999) appelle « vitesses marégraphiques », soit un champ de vitesses déduit d'une variation moyenne absolue du niveau de la mer (prise ici égale à $1,8 \pm 0,5$ mm/an), de laquelle on déduit les variations relatives observées au niveau des marégraphes ; 2) les vitesses verticales actuelles prédites par le dernier modèle global d'ajustement isostatique (ICE-5G, Peltier, 2004). Les paires de stations GPS-marégraphes sont réparties en plusieurs groupes, en fonction de la longueur des séries GPS et marégraphiques, ainsi que de la distance entre les deux instruments. Ne sont retenues pour cette comparaison que les vitesses GPS estimées sur des séries de 2,5 ans ou plus, des séries marégraphiques de 20 ans au moins, et une distance maximale de 40 km, soit 111 paires de sites. Les résultats de la comparaison entre les vitesses verticales GPS et marégraphiques sont excellents, avec 84 % des stations montrant un accord à mieux que 2 mm/an. La différence moyenne est de $-0,13 \pm 0,15$ mm/an, avec une dispersion de 1,65 mm/an (**Bouin & Wöppelmann, 2009** ; voir Figure 6). Ceci indique également qu'une estimation de la tendance moyenne absolue du niveau de la mer sur ces 111 stations marégraphiques, qui représentent un échantillon plus large que celui utilisé par (**Wöppelmann et al., 2009**), donne une valeur de $1,67 \pm 0,5$ mm/an. L'accord avec le modèle d'ajustement glaciaire ICE-5G est moins bon, avec une différence moyenne de $0,45 \pm 2,77$ mm/an et des différences

systématiques sur certaines régions (Alaska, Spitzberg, Fennoscandie) qui s'expliquent bien par de mauvaises prises en compte de régionalismes glaciaires ou géodynamiques du modèle (voir Figure 7 pour une comparaison).

La quasi-totalité des vitesses

GPS TIGA qui montrent un désaccord significatif avec l'un ou l'autre des champs de vitesses géophysiques utilisés sont confirmées par d'autres résultats de géodésie spatiale. Les différences significatives avec les vitesses marégraphiques trouvent probablement leur origine dans des effets géophysiques locaux affectant le support GPS (ou marégraphique) uniquement, ou bien

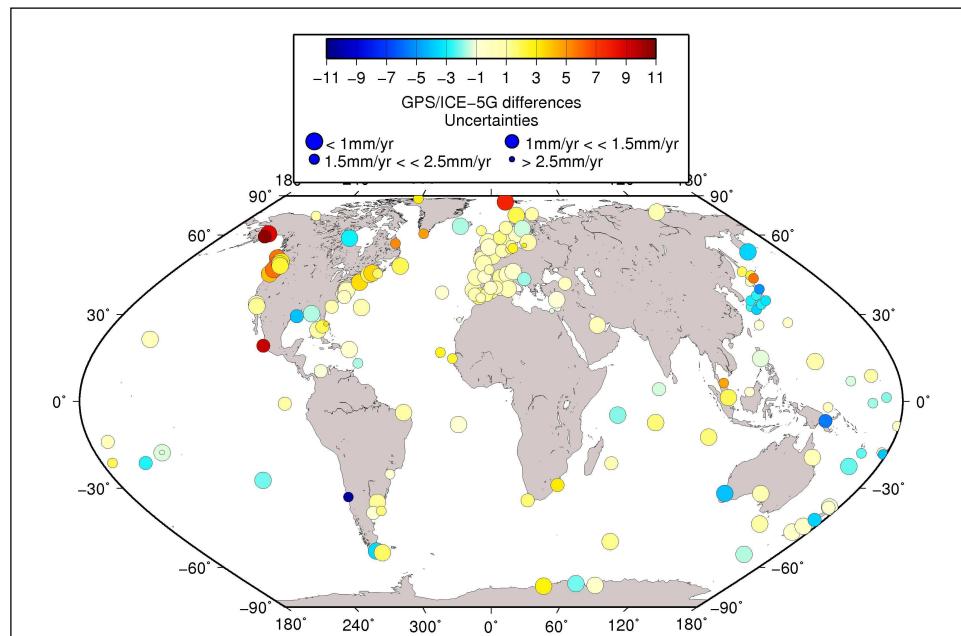


Figure 7 : Carte des différences de vitesses verticales GPS – modèle ICE-5G, sur 148 stations GPS du réseau TIGA, en fonction de leur incertitude estimée de manière réaliste (**Bouin & Wöppelmann, 2009**).

encore par un écart régional à la valeur moyenne de 1,8 mm/an utilisée pour la tendance de la variation du niveau marin.

Perspectives

Même si le projet TIGA a déjà permis d'obtenir des résultats significatifs, son évolution est loin d'être terminée. L'évolution du réseau, des modèles, des logiciels et des systèmes de référence a entraîné l'adaptation des moyens de calcul (avec l'achat en 2008 d'un supercalculateur) et de la stratégie d'analyse. Les travaux de Alvaro Santamaria (IGN Espagne, en thèse au LAREG sous mon encadrement et celui de G. Wöppelmann depuis début 2007) ont permis plusieurs avancées :

- plusieurs séries de tests méthodologiques ont permis de mesurer l'impact de la distribution des réseaux, des fonctions de projection (VMF1 ou GMF), des modèles de centre de phase d'antenne, de la prise en compte des effets de surcharge atmosphérique sur la définition du système de référence et l'estimation des vitesses verticales;
- la stratégie de calcul a été revue en fonction de ces résultats, avec en particulier la définition des sous réseaux de calcul de manière dynamique, à partir d'un algorithme de sélection optimale de la distribution des stations en fonction des données effectivement présentes. Le pourcentage d'ambiguïtés entières résolues s'en trouve amélioré, ainsi que le RMS des paramètres orbitaux et des positions hebdomadaires de stations par rapport à l'IGS;
- une réanalyse globale du réseau sur la période 1994-2009 est presque achevée, incluant 311 stations et prenant avantage de cette stratégie optimisée et des nouvelles capacités de calcul ; elle constituera la participation de TIGA à l'ITRF2008, sous forme de densification;

L'exploitation de cette solution optimisée devrait s'étendre au delà de la thèse d'Alvaro, avec la mise à disposition de ce nouveau champ de vitesses verticales homogènes couvrant 311 stations dont 240 présentent des séries de plus de 4,5 ans. Cela doit permettre une nouvelle estimation de la valeur moyenne absolue de la montée du niveau marin, à partir d'un réseau de sites GPS/marégraphes colocalisés plus dense et mieux distribué.

Du point de vue méthodologique, Alvaro poursuit les améliorations avec la prise en compte des ordres supérieurs de l'effet de l'ionosphère sur les signaux GPS, des corrections de l'effet basse fréquence uniquement de la surcharge atmosphérique, le développement d'un algorithme d'élimination des points faux au niveau des combinaisons journalières et hebdomadaires des solutions individuelles.

L'Université de la Rochelle constitue, depuis bientôt 7 ans, un centre très actif d'expertise (de référence ?) à la fois sur la définition des références verticales GPS et la marégraphie. Elle joue maintenant, grâce aux travaux d'Alvaro, un rôle d'animation dans la communauté GLOSS/TIGA/IGS.

II-3 Mesure de la surcharge océanique.

Contexte

La surcharge océanique est la conséquence directe de la variation de position des masses d'eau océaniques due à l'attraction de la lune et du soleil principalement, sur la croûte terrestre qui se comporte comme un solide élastique. Elle résulte en déformations verticales mais aussi horizontales de la

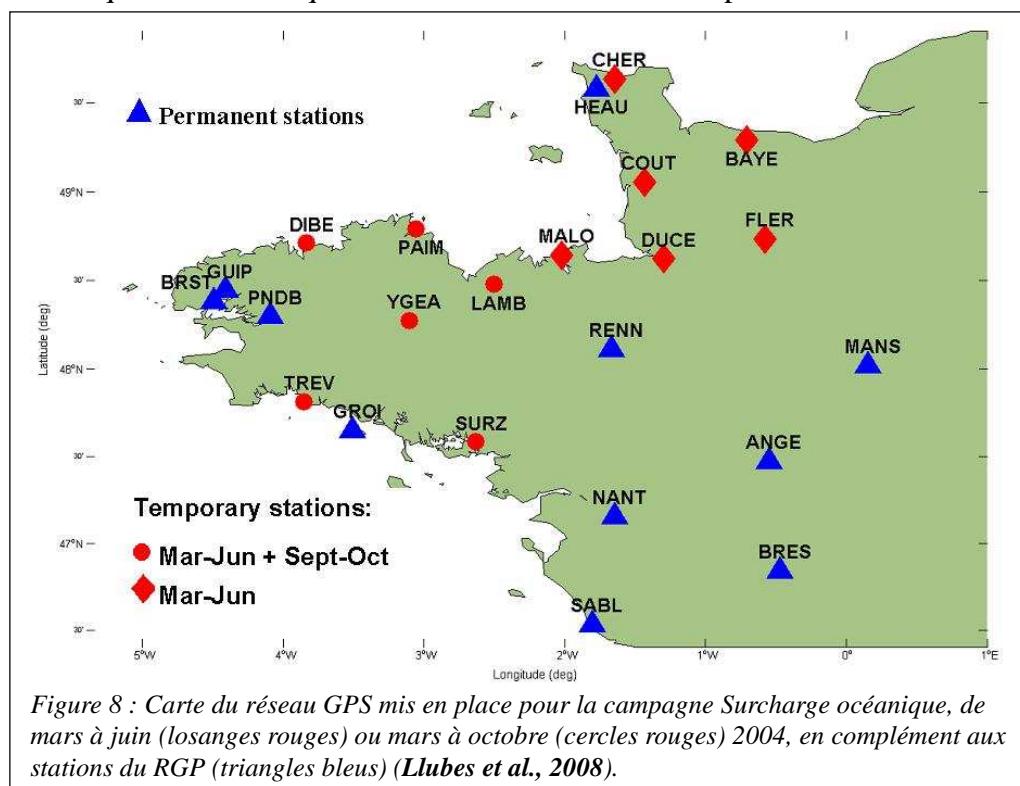


Figure 8 : Carte du réseau GPS mis en place pour la campagne Surcharge océanique, de mars à juin (losanges rouges) ou mars à octobre (cercles rouges) 2004, en complément aux stations du RGP (triangles bleus) (Llubes *et al.*, 2008).

croûte, ainsi qu'en variations du champ de gravité à la surface de la Terre, avec une périodicité principalement semi-diurne et diurne, calquée sur celle des marées océaniques. Les modèles de marée océaniques ont beaucoup progressé à la fin du XX^{ème} siècle grâce à la prise en compte des observations d'altimétrie satellitaire et l'amélioration de la puissance de calcul qui permet de travailler avec des grilles de meilleure résolution (FES1999 ; FES2004 ; TPXO99 ; Lyard *et al.*, 2006). Une campagne de gravimétrie menée en 1999 a cependant mis en évidence des différences significatives (jusqu'à 16%) entre modèles de surcharges et observations (Boy *et al.*, 2003 ; Llubes *et al.*, 2001 ; Lequentrec-Lalancette *et al.*, 2002 ; Amalvict *et al.*, 2001). Cela a motivé la mise en place d'une seconde campagne de mesures plus longue associant gravimétrie relative et absolue, inclinométrie et GPS sur la Bretagne et le Cotentin, la Manche constituant en effet une zone particulièrement intéressante de par l'amplitude des effets de charge et les effets non linéaires qu'on y observe.

Cette campagne a eu lieu au premier semestre 2004, avec 12 stations GPS semi permanentes installées en complément des stations du RGP (Figure 8). Elle a impliqué 11 équipes et 37 personnes de la communauté Sciences de la Terre française (Llubes *et al.*, 2008). Les données GPS ont été traitées par plusieurs équipes utilisant divers logiciels GPS scientifiques.

Résultats

Les effets de charge océanique sur la déformation de la croûte ont une amplitude maximale sur la composante verticale : cette amplitude atteint 7 cm à Brest, 4 cm à Cherbourg (modèle FES2004, Lyard *et al.*, 2006). On a donc développé une méthodologie de traitement adaptée à l'observation de ces effets verticaux d'une amplitude de quelques centimètres et d'une période principale proche de 12 h. Les données ont été traitées avec GAMIT, en fenêtres glissantes de 2 h répétées toutes les heures (ce qui constitue après plusieurs tests le meilleur compromis entre la quantité d'observations et l'échantillonnage du mouvement). Le réseau d'observation GPS spécifique à la campagne a été complété par une dizaine de stations européennes du réseau de référence de l'IGS, choisies parmi celles qui ne sont pas ou peu affectées par la surcharge océanique. La définition du système de référence, dans un calcul en sessions courtes limité géographiquement, constituait un point sensible de l'expérience. Deux stratégies ont été mises en concurrence, elles se sont révélées proches quant aux résultats. La première consistait à fixer le système de référence dans le calcul GPS avec des contraintes fortes (inférieures au mm) sur les positions a priori des stations de référence IGS. Ces positions a priori sont celles des orbites IGS utilisées (pour des raisons de cohérence), soit l'IGb00 (Ferland, 2003) corrigées des

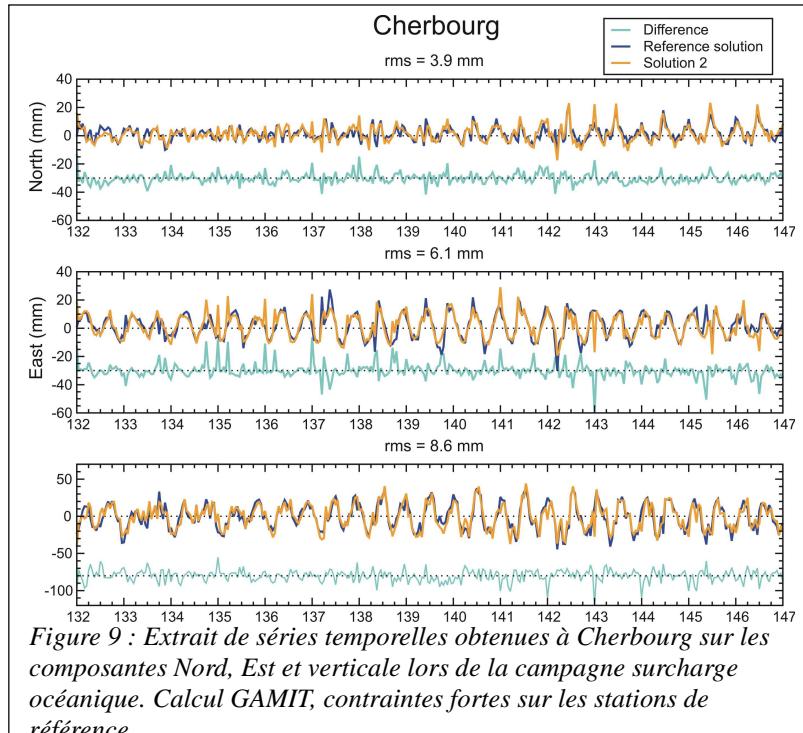


Figure 9 : Extrait de séries temporelles obtenues à Cherbourg sur les composantes Nord, Est et verticale lors de la campagne surcharge océanique. Calcul GAMIT, contraintes fortes sur les stations de référence.

effets de charge océanique modélisés par FES2004 sur ces stations. L'amplitude des effets de charge sur ces stations ne dépasse pas 17 mm dans le modèle, on s'attend donc à une erreur maximale de quelques millimètres sur ces positions de station, donc sur la définition du système de référence. La seconde stratégie consiste à procéder au calcul GPS en réseau libre, en estimant positions de stations et paramètres orbitaux. Les paramètres orbitaux sont ensuite combinés avec ceux des orbites calculées pour la solution hebdomadaire IGS par le centre d'analyse SIO, assurant ainsi la mise en référence de façon globale. Avec l'une ou l'autre de ces stratégies, nous obtenons une précision de 10 mm sur la détermination d'une position verticale (session de 2 h) et 3 mm sur les composantes horizontales (Vergnolle *et al.*, 2008 ; voir Figure 9 pour un extrait des séries temporelles obtenues à Cherbourg).

Les composantes principales de marée, quant à elles, sont extraites avec une précision meilleure que 1 mm à 95% d'incertitude (Vergnolle *et al.*, 2008) pour M2, N2, O1 et Q1. Les termes K2 et S2 s'avèrent plus délicats à discriminer. Les termes non linéaires S4 et MS4, par contre, sont observés de manière significative sur les stations situées dans la baie du Mont St Michel (MALO, COUT, DUCE, CHER, voir Figures 8 et 10).

A partir des mêmes données de campagne, traitées avec le logiciel GINS/Dynamo, une comparaison a été faite avec plusieurs modèles de surcharge océanique couramment utilisés, basés sur des modèles de marée récents : les modèles globaux TPXO.7.0, TPXO.6.2, GOT00.2, NAO99.b, CSR4.0, FES2004, et le modèle local NEA – 2004 (**Melachroinos et al., 2007**). Cette étude montre que, sur les termes linéaires au moins, le modèle se rapproche le plus des observations sur cette zone (Bretagne Nord et Cotentin) est le modèle local FES2004 modifié. Les modèles à moyenne résolution ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) incorporant peu de données marégraphiques sur cette zone peinent à représenter correctement le signal de surcharge en 3 dimensions.

Cette étude purement GPS aurait gagné à être complétée et mise en parallèle avec des analyses des signaux de gravimétrie et d'inclinométrie. Les instruments installés ont donné des résultats probants (**Llubes et al., 2008**) mais faute de temps et d'investissement, aucune comparaison exhaustive n'a été menée entre les différentes techniques de mesure. Cette expérience a néanmoins permis de démontrer la capacité du GPS à mesurer des signaux hautes fréquences avec une précision millimétrique, y compris sur la composante verticale.

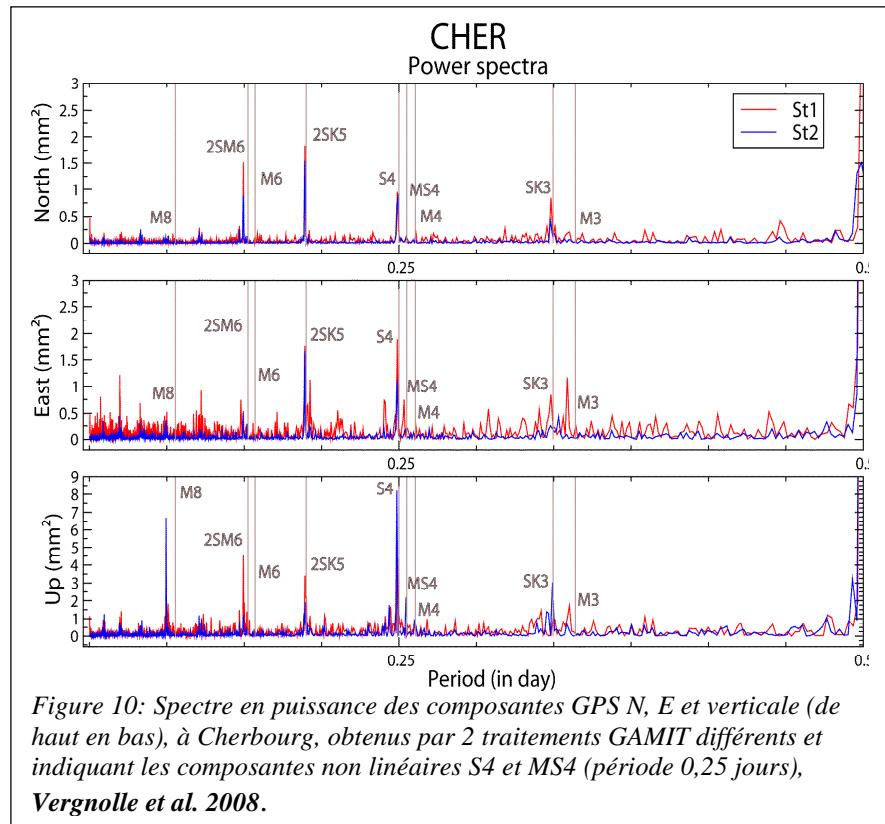


Figure 10: Spectre en puissance des composantes GPS N, E et verticale (de haut en bas), à Cherbourg, obtenus par 2 traitements GAMIT différents et indiquant les composantes non linéaires S4 et MS4 (période 0,25 jours), **Vergnolle et al. 2008**.

III GPS et vapeur d'eau atmosphérique

Il est maintenant classique (et c'est probablement un bon indicateur des progrès qui ont été faits ces dernières années en méthodologie GPS) d'associer incertitude sur le positionnement vertical et comportement de la troposphère. Pourtant, on se refuse ici à désigner la mauvaise modélisation de l'humidité atmosphérique comme la principale source d'erreur du GPS sur la composante verticale.

Des études de méthodologie cherchant à associer définition de système de référence et estimation du retard troposphérique zénithal (**Bock & Bouin**, manuscrit non publié, ainsi que plusieurs études de stagiaires) ont montré que l'indétermination des systèmes de référence joue un rôle au moins équivalent à celui de l'humidité atmosphérique dans l'inexactitude du positionnement vertical.

Par contre, on a assisté depuis une décennie aux progrès significatifs de la modélisation de l'humidité atmosphérique dans les logiciels GPS. Ceci concerne à la fois les fonctions de projection, puisque les dernières en dates intègrent les paramètres des analyses du centre météo européen (ECMWF, voir Boehm *et al.*, 2006a pour la Vienna Mapping Function ou VMF1) et les paramètres sol servant à calculer les valeurs *a priori*. Même si d'énormes progrès restent à faire - utiliser des mesures *in situ* selon des directions obliques par exemple, afin de sortir de la paramétrisation en couches atmosphériques horizontales qui est pour l'instant commune à tous les logiciels - il était logique que la tendance s'inverse : la mesure de contenu intégré humide dans l'atmosphère par GPS est passée du statut de palliatif à celui d'outil à part entière, qui vient concurrencer et même distancer les mesures plus traditionnelles comme les radio sondages ou les radiomètres. Nous présentons dans cette partie quelques développements et expériences auxquels on a contribué.

III-1 Méthodologie : du produit dérivé à l'outil innovant.

Contexte

Le tournant du siècle a été marqué, du point de vue des applications de la géodésie spatiale, par la démonstration de la capacité du GPS à mesurer le contenu intégré en vapeur d'eau de la troposphère (CIVE ci après) avec une précision au moins équivalente à celle des radio sondages, qui fournissent les observations traditionnellement assimilées dans les modèles (voir par exemple Bevis *et al.*, 1992 ; Yuan *et al.*, 1993 ; Bevis *et al.*, 1994 ; Businger *et al.*, 1996 ; Duan *et al.*, 1996 ; Fang *et al.*, 1998 ; Tregoning *et al.*, 1998 ; Jerret & Nash, 2001). Le GPS présente l'avantage d'être un instrument fiable, peu onéreux, qui fonctionne de manière autonome. Il est beaucoup plus économique sur le long terme que tous les instruments nécessitant un opérateur et/ou du matériel perdu (radio sondages, lidars...). Par rapport aux photomètres

solaires type Aeronet, il présente l'avantage de fournir un CIVE quel que soit le temps et la période du jour. Il a une résolution temporelle (typiquement 1 ou 2 h) beaucoup plus intéressante que celle des radio sondages (pour des raisons de coût) ou des mesures satellitaires (SSM/I) ; il n'est pas assujetti spatialement aux traces satellitaires. Par contre, il ne fournit pas de profil mais une information intégrée, et sa mesure est ponctuelle. Sa précision a été estimée par plusieurs auteurs (Emardson *et al.*, 1998 ; Tregoning *et al.*, 1998 ; Haase *et al.*, 2003) à 1 kg/m^2 , soit comparable à celle affichée pour les profils de radio sondages, pour les zones tempérées. On a montré à l'occasion de la campagne MAP (Meso Alpine Programme, Bougeault *et al.*, 2001), par une intercomparaison de mesures et réanalyses que les mesures GPS étaient en bon accord avec les analyses ECMWF (qui assimilent des données de radio sondages mais pas de GPS) malgré un biais « sec » d'environ 1 kg/m^2 sur les mesures de radio sondages. La quantification de l'exactitude du CIVE par GPS sur d'autres régions du monde (Afrique inter tropicale ici) restait par contre à faire.

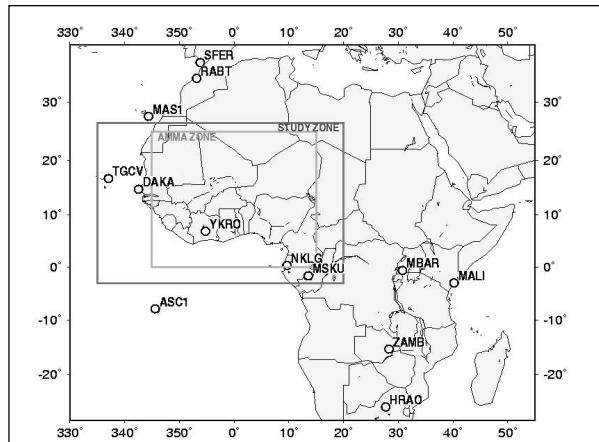


Figure 11 : Carte du réseau des stations IGS sur la zone retenue en 2004 (Walpersdorf *et al.*, 2007).

Résultats

La mise en place du programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) de 2005 à 2007 (pour la période d'observations renforcées), sur les pays d'Afrique de l'Ouest situés au Nord du Golfe de Guinée, a été l'occasion de démontrer faisabilité et apport des mesures de CIVE par GPS sur cette région du monde. Notre participation au programme (installation de plusieurs stations permanentes) a été préparée par plusieurs pré études qui visaient à :

- quantifier de manière théorique les sources d'erreurs sur l'estimation du CIVE par GPS spécifiques à cette région (**Walpersdorf et al., 2007**)
- comparer les mesures de CIVE par GPS existantes sur l'ensemble de l'Afrique à d'autres observations et modèles afin d'avoir une estimation de leur exactitude (**Bock et al., 2007**).

L'une et l'autre études s'appuient sur les stations IGS opérationnelles sur la zone 35N-10S, 25W-45E et la période 1999-2004 (au nombre de 13, voir figure 11). Dans le premier cas, on a examiné l'influence de la précision des orbites finales IGS sur la zone (en lien avec l'espacement des sites de mesure, donc la longueur des lignes de base), celle de la perte de données due à l'activité ionosphérique, et celle de la mauvaise modélisation de la surcharge océanique. On a montré que l'activité ionosphérique, qui était maximale (en lien avec le cycle solaire) dans la 2^e moitié de l'année 2001 a une influence limitée à 2 à 7% de perte de données sur la 2^e fréquence GPS, sauf dans le cas où le récepteur GPS est un modèle ancien (Rabat) – voir figure 12 (**Walpersdorf et al., 2007**).

Cet effet est donc négligeable dans le cadre de l'installation d'un réseau avec du matériel neuf, sur une période (AMMA) d'activité solaire réduite. Le report du signal de surcharge océanique (dans le cas où on ne le corrige pas avec un modèle) sur la mesure de CIVE peut résulter en une erreur significative de 2 kg/m^2 (voir figure 13, **Walpersdorf et al., 2007**). Par contre elle devient négligeable une fois corrigée dans le calcul GPS, et ce quel que soit le modèle utilisé (on estime à 15% l'erreur maximale sur la composante verticale de surcharge dans les modèles).

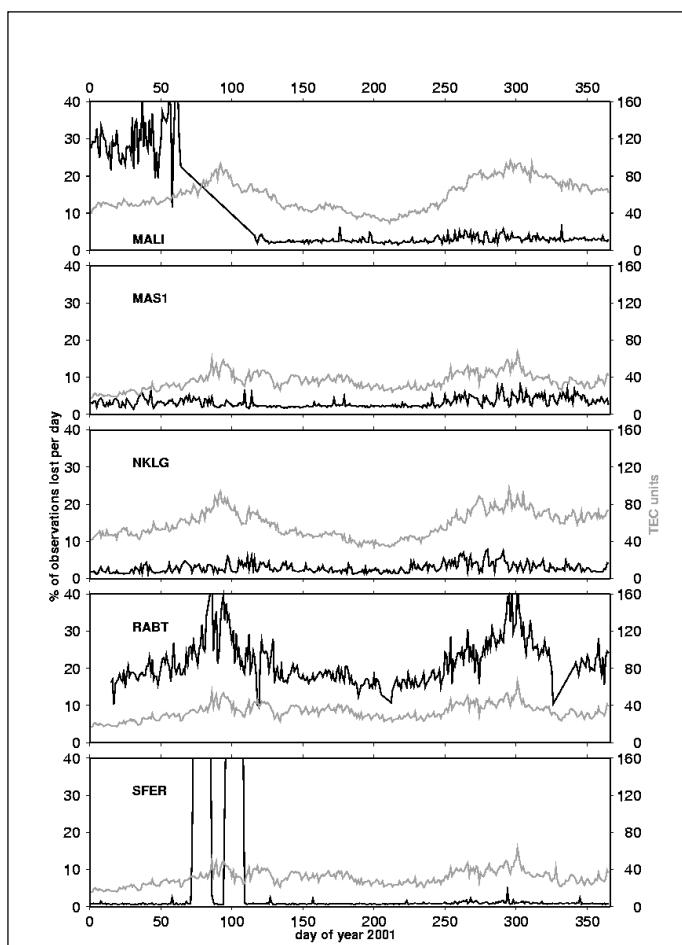
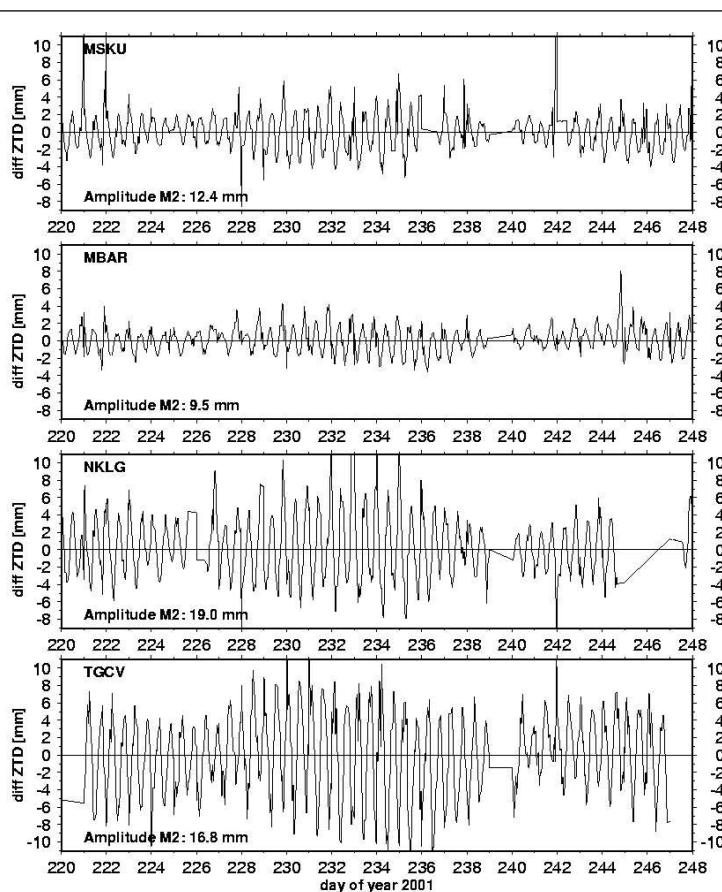


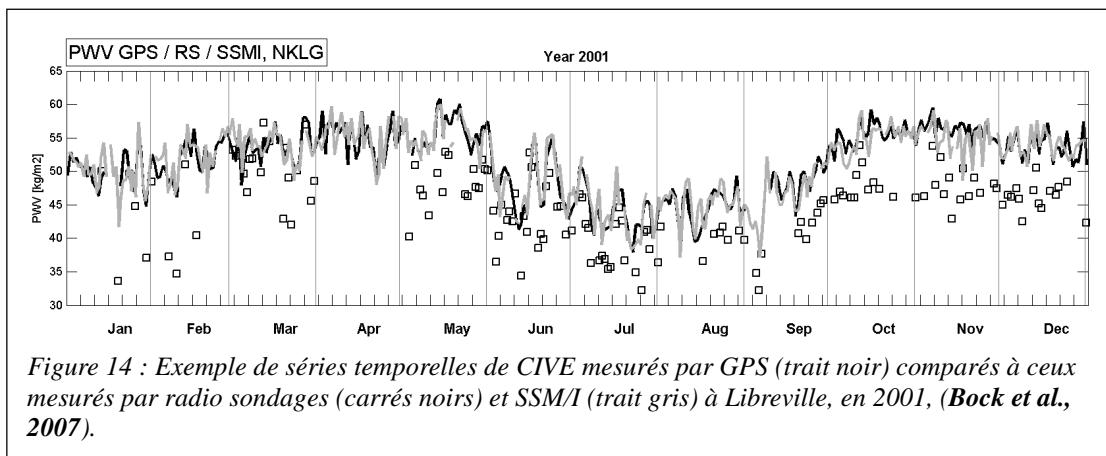
Figure 12 : Pourcentage de perte de données sur la 2^e fréquence GPS par rapport au nombre total d'observations sur les stations IGS de Malindi, Maspalomas, Libreville, Rabat et San Fernando en 2001. Le changement abrupt à Malindi est dû à un changement de matériel. Rabat présente des performances nettement inférieures car le récepteur est un modèle ancien. En gris figure le contenu électronique total moyen par jour. (Walpersdorf et al., 2007)

Dans le deuxième cas, on compare les CIVE estimés par GPS à partir des analyses opérationnelles de l'IGS avec des mesures par radio sondages, par les photomètres solaires du réseau Aeronet, par les radiomètres micro ondes satellitaires de SSM/I ainsi qu'aux réanalyses ERA40 du centre européen (Simmons & Gibson, 2000) et NCEP2 (Kanamitsu *et al.*, 2002) – **Bock *et al.*, 2007**. Ces comparaisons sont indépendantes dans la mesure où aucune donnée GPS n'a été assimilée ni dans ERA40 ni dans NCEP2. Elles sont par contre limitées par le peu de données disponibles sur l'Afrique de l'Ouest (cela inclut le GPS à l'époque où cette comparaison a été faite) qui entraîne une imprécision des réanalyses sur cette zone, et, en général, des distances importantes entre les points intercomparés (jusqu'à 150 km) avec des différences d'altitude tout aussi sensibles (jusqu'à 200 m). Or, on a montré (**Bock *et al.*, 2005**) que ces



*Figure 13 : Différence dans le retard troposphérique zénithal estimé avec et sans correction de surcharge océanique (CSR4.0, Eanes 1994) pour les stations de Franceville, Mbarara ; Libreville et Cap Vert. 6 mm d'erreur sur le ZTD correspondent à environ 1 mm d'erreur sur le CIVE. L'amplitude du terme principal de surcharge M2 est indiquée pour chaque station (Walpersdorf *et al.*, 2007).*

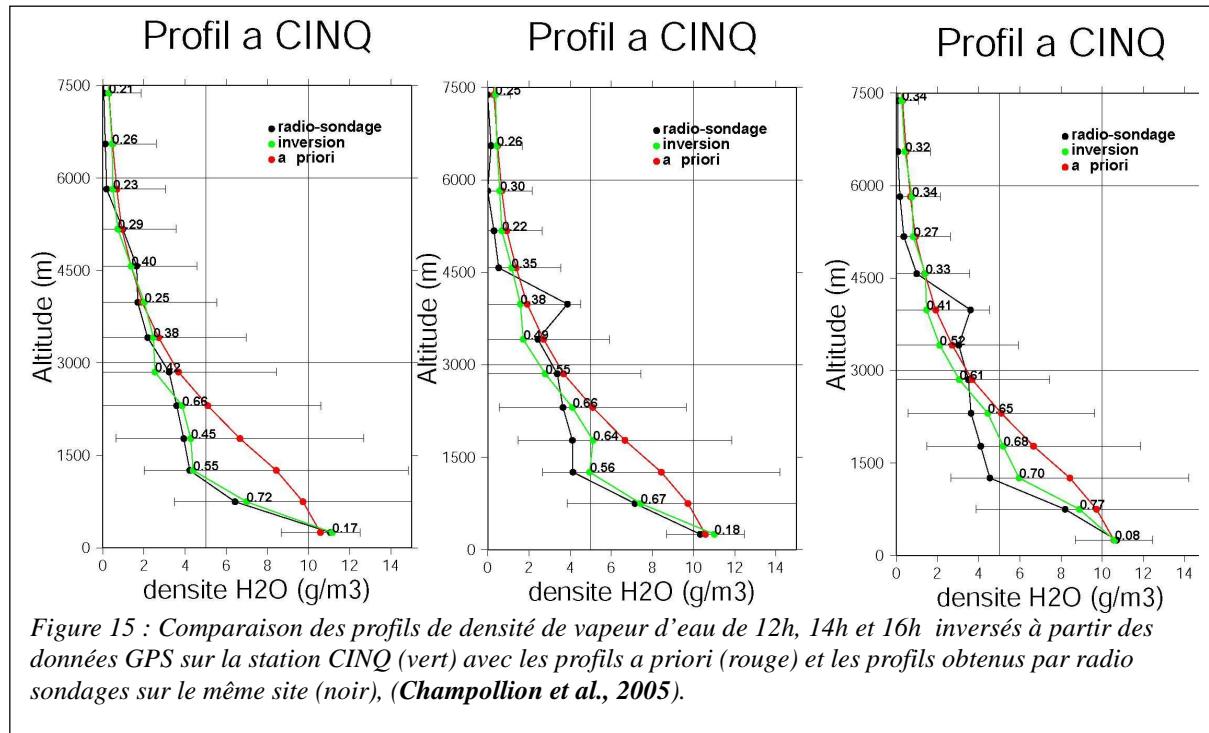
2 facteurs (la différence d'altitude en particulier) limitaient fortement la portée de la comparaison. Des corrections d'altitude et d'interpolation par rapport aux points de grilles des modèles (ERA40 et NCEP2) ont donc été appliquées. Les comparaisons GPS/radio sondages



*Figure 14 : Exemple de séries temporelles de CIVE mesurés par GPS (trait noir) comparés à ceux mesurés par radio sondages (carrés noirs) et SSM/I (trait gris) à Libreville, en 2001, (Bock *et al.*, 2007).*

(sur 4 stations) mettent en évidence un biais sec des mesures de CIVE par radio sondages (jusqu'à -9 kg/m^2) beaucoup plus important que ce qui est détecté habituellement sur l'Europe (figure 14). Ce biais, lié à l'utilisation de sondes RS80 de Vaisala, est déjà connu (Wang *et al.*, 2002). L'accord du CIVE GPS avec les mesures Aeronet est par contre très bon (écart moyen 2%, avec un écart type de 12%), ainsi que celui avec les mesures SSM/I (biais moyen inférieur à 8%). On obtient aussi un bon accord général avec les réanalyses ERA-40 (9% de différence moyenne avec un écart type de 17%) en cohérence avec l'assimilation de données de radio sondages et SSM/I dans les analyses. Le biais sur les mesures de radio sondages sont vraisemblablement compensés par l'assimilation d'autres données. La comparaison entre les CIVE GPS et ceux extraits des réanalyses NCEP2 est moins bonne, avec des biais de -8 à 14% et un écart type de 11 à 20%. Ceci s'explique vraisemblablement d'une part par la résolution de la grille ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$ contre $1,125^\circ \times 1,125^\circ$ pour ERA-40) d'autre part par la non assimilation des données SSM/I (les données radio sondages, avec leurs biais importants sur cette zone, sont par contre assimilées). Un autre résultat de cette étude est que la qualité des réanalyses, à l'échelle de temps de quelques heures (elles sont disponibles avec un pas de temps de 6 h) à quelques jours, est assez mauvaise. Il y aurait donc un grand intérêt, au moins pour le paramètre CIVE, à ce que les résultats GPS puissent être assimilés dans ce type de réanalyses. Des études sur l'assimilation de CIVE estimés par les modèles avaient déjà été menées (Gutman, 2004) et les CIVE estimés à partir du réseau permanent RGP sont depuis assimilés dans les modèles européens, ceux de Météo France en particulier (Poli *et al.*, 2008 ; Yan *et al.*, 2008).

Une application encore plus novatrice que l'utilisation des sous produits du GPS pour améliorer les modèles météo consiste à utiliser la couverture tri dimensionnelle de l'atmosphère par les signaux satellites-stations du GPS pour estimer une représentation 3D de l'humidité atmosphérique. Le procédé est comparable à celui de la tomographie utilisé en recherche médicale pour obtenir une image du corps humain, ou encore à la tomographie de la lithosphère et du manteau terrestre à partir des signaux sismiques. Ceci ne peut fonctionner que sur une zone limitée (à cause de la variabilité spatiale importante de l'humidité atmosphérique) et très bien couverte par un réseau GPS dense (de manière à disposer de plus



d'observations que de paramètres à inverser). Des expériences de tomographie atmosphérique par GPS ont déjà été menées au tournant du siècle : Flores *et al.* (2000) sur le volcan Kilauea, Gradinarsky (2002) autour de Göteborg. La communauté française utilisant le GPS pour la mesure de CIVE a à son tour développé un tel outil (**Champollion *et al.*, 2005**) qui a ensuite été appliqué à plusieurs campagnes de mesures avec des résultats probants : situation de mistral et brise de mer autour de Marseille (Bastin *et al.*, 2005), situation d'initiation de convection pendant la campagne américaine IHOP en 2002 (Champollion *et al.*, 2009).

Dans un premier temps, le logiciel a été validé à partir de simulations utilisant la configuration réelle du réseau Escompte installé à proximité de Marseille (Cros *et al.*, 2004), soit 17 stations sur un carré de 20 km de côté avec des altitudes s'échelonnant du niveau de la mer à 700 m (figure 16). Plusieurs répartitions de l'humidité atmosphérique, hétérogènes ou en couches horizontales, ont été testées afin d'affiner les paramètres de l'inversion. Les résultats montrent que les structures qui ne couvrent pas toute la surface du réseau sont très correctement restituées, à toutes les hauteurs (couches tous les 250 m), mais qu'une anomalie couvrant toute la surface du réseau ne sera correctement inversée que si elle est suffisamment basse (sous la première couche). Dans tous les cas, les variations latérales sont bien perçues. Le logiciel a ensuite été appliqué sur la station CINQ, située au centre du réseau, pour obtenir des profils verticaux inversés à partir de profils a priori théoriques et des données GPS. Les résultats ont été comparés aux profils de radio sondages sur cette station (3 sondages) pour un jour de la campagne Escompte, en 2001. La comparaison quantitative n'est pas forcément facile puisque les inversions GPS correspondent à un profil sur la zone autour de la station, et sont moyennées sur 15 minutes alors que le sondage s'étend sur 30 minutes et est dévié par le vent. La comparaison qualitative montre malgré tout que l'inversion permet d'obtenir un profil de densité de vapeur d'eau plus proche de celui du sondage que le profil a priori (figure 15). Toujours à partir de ces données Escompte, on a obtenu des coupes verticales selon les directions N-S ou E-O, montrant une répartition en 2 dimensions de la densité de vapeur d'eau à 12 h, 13 h et 14 h, le même jour (figure 16). On constate que la répartition de vapeur d'eau reste globalement horizontale, variant peu par rapport à la modélisation classique des logiciels GPS. Sur le profil N-S, on observe la formation d'une couche humide vers 1500 m au dessus de l'agglomération marseillaise, avec déplacement vers le sud. Sur les profils E-O, on voit très clairement l'accumulation de l'humidité dans la vallée orientée E-O, entre Marseille et Aubagne. Cela correspond à l'effet de la brise de mer qui vient chasser l'humidité jusqu'au fond de la vallée (en accord avec les données des profileurs de vent, qui montrent une brise de mer orientée SO en dessous de 1000 m, et SE au dessus).

Ces premiers exemples montrent que le GPS est sorti de sa condition de fournisseur de produits dérivés utilisables en météo pour devenir un outil à part entière, qui permet d'avoir accès à des informations nouvelles. On a maintenant suffisamment de recul sur son utilisation « classique », comme outil de mesure de la vapeur d'eau intégrée pour savoir que les mesures obtenues sont largement aussi précises et fiables (moins soumises à des biais) que celles des instruments historiques (radio sondages, radiomètres...) et souvent plus complètes.

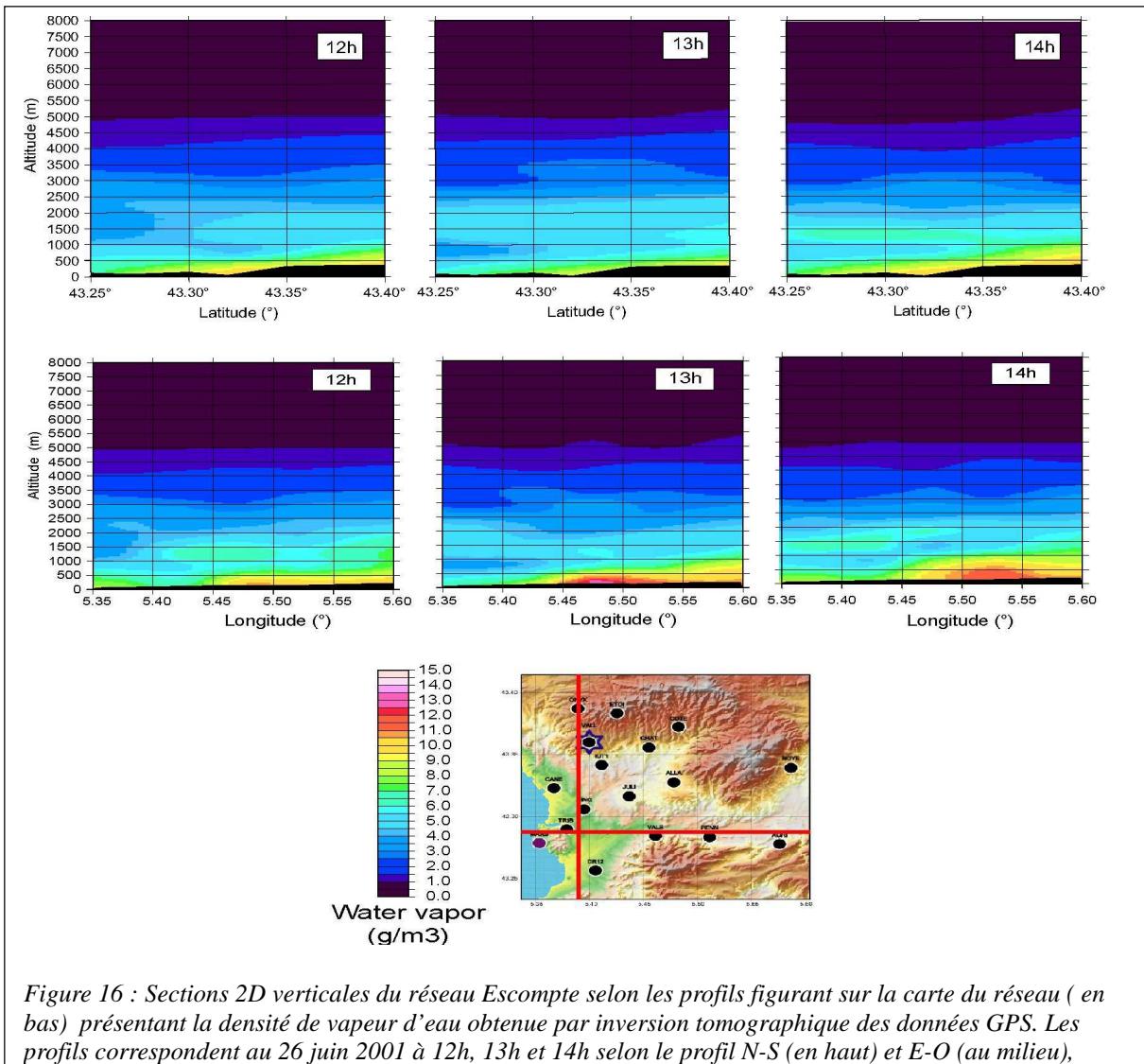


Figure 16 : Sections 2D verticales du réseau Escompte selon les profils figurant sur la carte du réseau (en bas) présentant la densité de vapeur d'eau obtenue par inversion tomographique des données GPS. Les profils correspondent au 26 juin 2001 à 12h, 13h et 14h selon le profil N-S (en haut) et E-O (au milieu), (Champollion et al., 2005).

III-2 GPS et mousson Africaine

Contexte

Les objectifs scientifiques du programme AMMA s'étendent de la compréhension des interactions océan-atmosphère dans le Golfe de Guinée à celle du cycle hydrologique aux limites du Sahel, en incluant le rôle des aérosols et des polluants, pour ne citer que quelques uns de ses aspects. Le suivi de la formation et de la progression des masses humides atmosphériques y tient naturellement une place importante, et le GPS, grâce à son faible coût humain, sa robustesse et la capacité des nouveaux récepteurs à stocker des volumes importants de données, s'est imposé comme un outil particulièrement adapté. Les études préliminaires que nous avions menées sur la faisabilité de l'utilisation du GPS permanent en réseau peu dense en Afrique de l'Ouest pour le suivi de l'humidité atmosphérique se devaient donc de déboucher sur une participation active à la campagne AMMA. La géométrie du réseau selon 2 profils N-S espacés de quelques 300 km, qui s'étendent de 500 km au Nord du Golfe de Guinée à la frontière sahélienne, correspond à la progression des masses d'air humides qui remontent du Golfe de Guinée puis s'étalent vers l'Ouest pendant la période de mousson (figure 17). Grâce à une implication très précoce dans la campagne et à des

partenariats noués avec le personnel IRD de Niamey, Cotonou et Ouagadougou, ainsi que plusieurs institutions africaines (DNM Mali entre autres), nous avons pu installer une première partie du réseau pour suivre la progression de la mousson dès 2005. Trois stations permanentes correspondant à la période d'observation renforcée (EOP) 2005-2007 ont été installées sur les aéroports de Niamey et Gao, et le site instrumenté météo de Djougou. Leur emplacement reprend celui des supersites hydrologiques de AMMA, avec observations hydrologiques et météorologiques renforcées. Avant la période de mousson 2006 (qui

correspond à la période d'observation spécifique ou SOP), 3 sites supplémentaires ont été installés selon le second profil, à l'ouest du premier, à Tombouctou, Ouagadougou et Tamale (figure 17). Prévus au départ pour un peu plus de 6 mois, ils ont finalement été transformés en stations permanentes et fonctionnent de fait de manière continue depuis plus de 3 ans. Plusieurs dispositifs de transfert de données en temps quasi réel (par satellite ou réseau GSM) ont été testés. Au final, seule la station de Niamey a pu faire l'objet d'un transfert temps réel pendant toute la durée de l'EOP.

Ces données ont été traitées selon différentes procédures et en temps plus ou moins différé en fonction de plusieurs objectifs (**Bock et al., 2008**) :

- un premier calcul en temps quasi réel (CIVE disponibles moins de 1h30 après la fin de la mesure) était destiné à fournir, sur les stations pour lesquelles le transfert rapide pouvait se faire, une information peu précise mais utilisable comme outil d'aide à la prévision des périodes d'observations intensives de la campagne. Ce calcul s'est effectué de manière automatique toutes les 3 h pendant toute la durée de la SOP, puis la fin de l'EOP.
- un second calcul, rapide, fournissait sur les 3 stations de la SOP des CIVE plus précis moins de 24 h après la fin de la mesure.
- un calcul final, ou précis, rassemblait l'ensemble des données sur les stations d'Afrique de l'Ouest (dont celles de Tamanrasset, fournies gracieusement par le CRAAG et GPSCOPE) et permettait de disposer avec un délai de 15 jours (orbites précises de l'IGS) de CIVE obtenus selon une procédure à l'état de l'art.

L'ensemble de ces calculs se sont faits de manière automatisée, toutes les 24 h ou dès l'apparition des données pour les 2 derniers.

Parallèlement à ces procédures automatiques, des réanalyses ponctuelles ont permis de disposer de solutions optimales en fonction des progrès des logiciels et modèles (utilisation de la fonction de projection VMF1) et homogènes sur l'ensemble de la durée des mesures.

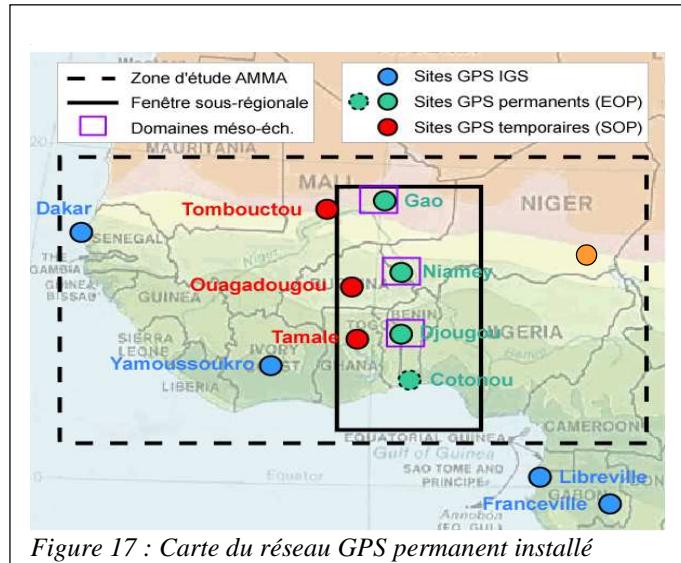


Figure 17 : Carte du réseau GPS permanent installé pendant l'EOP (vert) et la SOP (rouge). Sur les stations IGS qui pré existaient (en bleu), seules celles de Libreville et Dakar ont fonctionné.

Résultats

Une première partie de l'exploitation de ces stations GPS AMMA a consisté à comparer les différentes solutions entre elles ainsi qu'avec d'autres types de mesures ou d'analyses du CIVE en Afrique de l'Ouest, comme ce qui avait été fait pour la pré étude (Bock *et al.*, 2008).

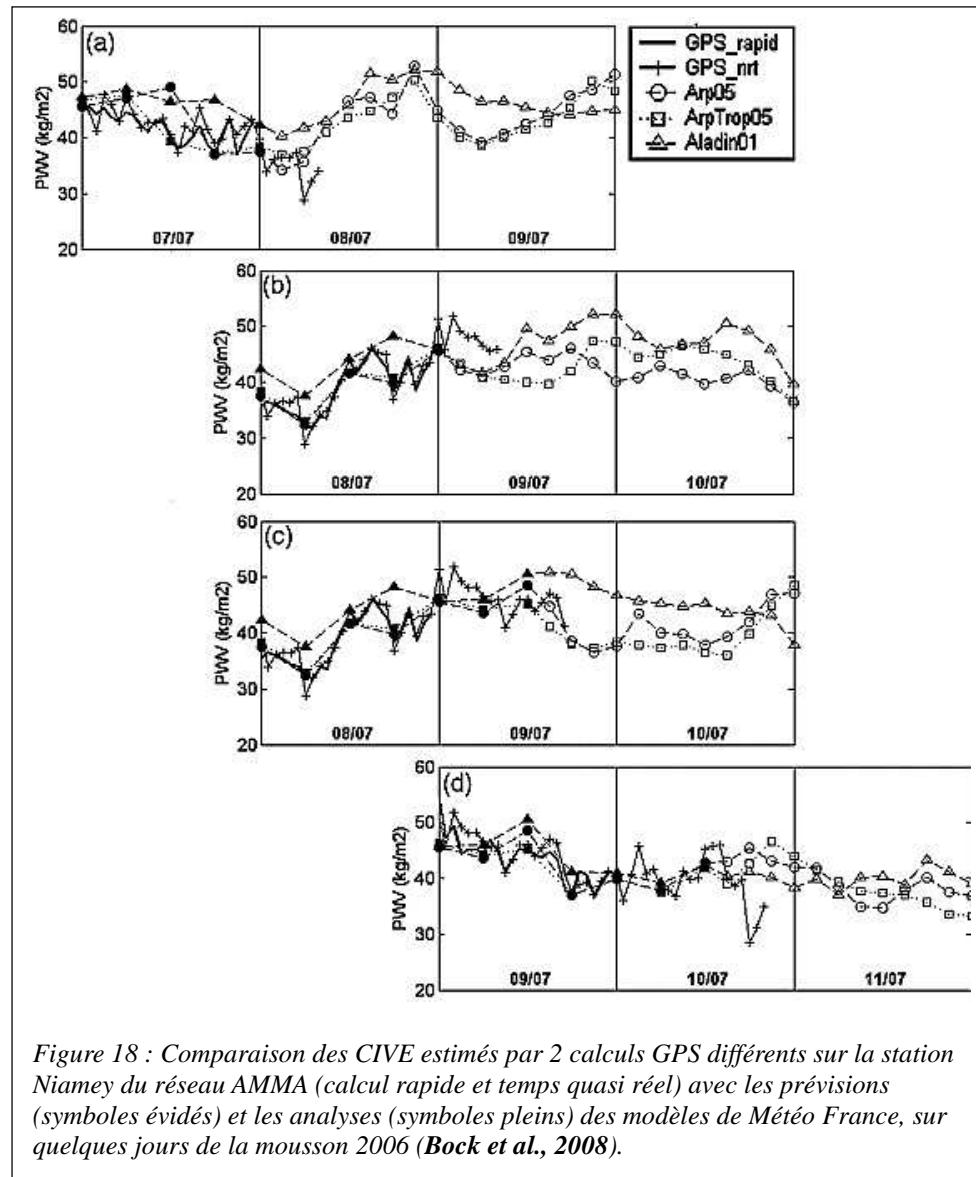


Figure 18 : Comparaison des CIVE estimés par 2 calculs GPS différents sur la station Niamey du réseau AMMA (calcul rapide et temps quasi réel) avec les prévisions (symboles évidés) et les analyses (symboles pleins) des modèles de Météo France, sur quelques jours de la mousson 2006 (Bock *et al.*, 2008).

La figure 18 montre une telle comparaison pour une période de quelques jours pendant la mousson 2006, avec un épisode de pluie limité (9 mm) pendant la nuit du 8 au 9 juillet à Niamey. La succession des prédictions (et des corrections qui y sont faites au fur et à mesure que l'on avance dans le temps) montre que certains pics d'humidité qui précèdent de peu les précipitations (le premier pic dans la nuit du 8 au 9) sont prédits mais mal temporisés par les modèles, alors que d'autres (le second pic, le 9 au matin) n'apparaissent pas du tout. On observe également que la variabilité haute fréquence de l'humidité atmosphérique (en particulier le cycle diurne) est très mal reproduite, même dans la partie analyse des modèles. Un cycle diurne d'amplitude 0,5 à 1 kg/m² de CIVE est visible sur l'ensemble des solutions précises GPS pour les 6 stations permanentes, mais n'apparaît pas dans les analyses ou prévisions. Ceci illustre bien l'intérêt de disposer des résultats CIVE par GPS en temps peu différé comme aide à la prévision.

Les solutions en temps quasi réel et rapides ont été utilisées pendant la SOP pour l'évaluation des analyses et prévisions dédiées de Météo France (ARPEGE et ARPEGE-Tropiques à 0,5° de résolution, et ALADIN à couverture limitée et 0,1° de résolution). Les points de grille les plus proches ont été utilisés pour la comparaison, ce qui semble valide puisque la variabilité spatiale horizontale des modèles est faible. La

Les comparaisons entre les CIVE estimés par GPS et ceux des radio sondages confirment le biais sec important qui avait déjà été observé sur les sites IGS africains. La fréquence des CIVE estimés par GPS et celle des radio sondages pendant la SOP permettent même de mettre en évidence une dépendance au type de sonde et l'heure du lancer. Ces biais se traduisent par un léger biais sec dans les analyses Météo France sur cette zone (biais qui n'apparaît pas dans les prévisions) puisque les modèles assimilent les données des radio sondages. Un schéma correctif a d'ailleurs été développé (Nuret *et al.*, 2008) puis appliqué à l'assimilation de radio sondages dans AMMA.

Les CIVE estimés par GPS permettent d'étudier la variabilité de l'humidité atmosphérique pendant tout le cycle de mousson et à différentes échelles de temps (Bock *et al.*, 2008). Ils permettent par exemple de définir plusieurs périodes caractéristiques du début et de la progression de la mousson en fonction de

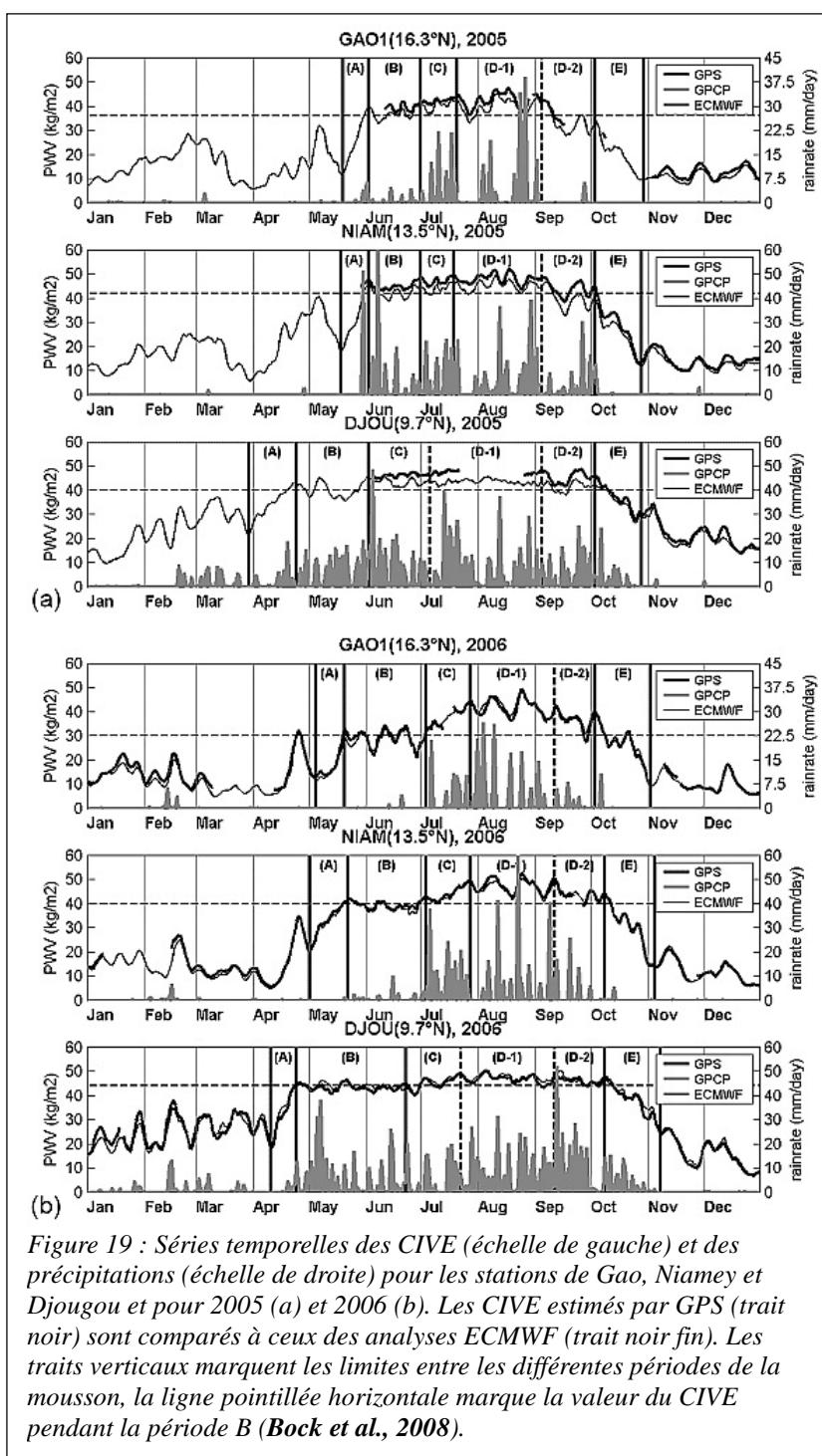


Figure 19 : Séries temporelles des CIVE (échelle de gauche) et des précipitations (échelle de droite) pour les stations de Gao, Niamey et Djougou et pour 2005 (a) et 2006 (b). Les CIVE estimés par GPS (trait noir) sont comparés à ceux des analyses ECMWF (trait noir fin). Les traits verticaux marquent les limites entre les différentes périodes de la mousson, la ligne pointillée horizontale marque la valeur du CIVE pendant la période B (Bock *et al.*, 2008).

l'humidité atmosphérique (représentée par le CIVE) et non des précipitations. La figure 19 montre 5 périodes caractéristiques successives pour les 3 stations de l'EOP, en 2005 et 2006. L'utilisation du CIVE plutôt que des précipitations comme index de progression de la mousson permet un suivi plus précis. On constate par exemple qu'un CIVE en dessous de 30 kg/m² correspond à une absence de précipitations et que le passage à un CIVE de plus de 40 kg/m² semble indiquer le saut de mousson (qui correspond à la migration vers le Nord de la Zone de Convergence Inter Tropicale ou ZCIT, vers fin juin, Sultan & Janicot, 2003). La première période (A) repérée sur la figure 19 correspond à l'installation des masses d'air

humides atmosphériques, et s'étale de avril à mai en fonction des sites. Elle est systématiquement précédée d'un ou plusieurs pics importants de CIVE. Elle est suivie par une période stationnaire (B) avec des oscillations de CIVE pour les sites sahéliens et des précipitations intenses pour les sites méridionaux. On observe ensuite le saut de mousson proprement dit (C) avec une augmentation du CIVE, des précipitations sur tous les sites et le déplacement de la ZCIT. La période suivante (D-1 et D-2) correspond à la mousson proprement dite, puis au début de son retrait. Elle se caractérise par l'essentiel des précipitations, des CIVE assez stables avec des oscillations de périodes 10-15 j ou 15-20 j selon les sites. La dernière période (E) voit la fin des précipitations et la décroissance très rapide du CIVE sous les 30 kg/m^2 . Cette étude permet également de mettre en évidence des différences entre le cycle de mousson 2005 et 2006 (début retardé de la mousson en 2006 par exemple), et démontre l'intérêt de disposer de plusieurs années de mesures continues.

Une des forces du GPS comme outil de mesure du CIVE est qu'il permet l'étude du cycle diurne, grâce à son bon échantillonnage temporel. Ici, le cycle diurne est marqué pendant les périodes de début de mousson (A et B) en lien avec la présence de la discontinuité intertropicale, avec des amplitudes de $1,5 \text{ kg/m}^2$. Il est par contre réduit pendant la période de mousson proprement dite, probablement parce que la convection intense, les précipitations et les flux de chaleur latente importants se compensent à ces échelles de temps (**Bock et al., 2008**).

Perspectives

Les résultats obtenus pour l'instant ne concernent que les 2 premières années de suivi par GPS de la mousson africaine. Une très bonne mobilisation de la communauté GPS-météo française a permis de transformer ces 6 sites en vraies stations permanentes. Ces stations ont vocation à devenir des stations IGS, qui viendront renforcer le réseau trop peu dense dans cette région, et pourront être utilisées comme stations de référence par les instituts géographiques locaux. L'obstacle reste pour l'instant un système de transmission de données fiable et peu coûteux. Le serveur de calcul continue à fonctionner avec des analyses rapides toutes les 24 h, et des réanalyses précises régulières. Nous disposons maintenant de plus de 4 ans de CIVE estimés par GPS selon une stratégie d'analyse à l'état de l'art. Ces résultats bruts doivent être exploités et valorisés pour l'étude du cycle de l'eau par O. Bock et S. Nahmani dans le cas de sa thèse (que je co encadre avec O. Bock).

Du point de vue du cycle hydrologique en Afrique de l'Ouest, plusieurs questions ouvertes concernent :

- le rôle de l'évapotranspiration dans le déclenchement et l'évolution du processus de mousson ;
- le rôle du cycle diurne marqué dans l'humidification atmosphérique avant le saut de mousson ;
- les interactions des systèmes convectifs à mésoscale avec l'humidité atmosphérique ;

Comme tous les gros programmes, AMMA va rentrer dans une deuxième phase, essentielle, d'exploitation des mesures et analyses effectuées pendant les années d'observation renforcée. Parallèlement à cela, la campagne Hymex d'étude du cycle hydrologique en Méditerranée se met en place pour commencer en 2012 (voir <http://www.hymex.org/index.php?lang=francais>). Un volet GPS existe d'ores et déjà dans la prospective Hymex, qui fera le lien avec les masses humides atmosphériques au dessus de l'Afrique de l'Ouest.

Les stations GPS permanentes africaines de AMMA ont trouvé une autre utilisation avec le début en 2008 de la campagne GHYRAF (Hinderer *et al.*, 2009) financée par l'ANR jusqu'en 2010. Son premier objectif est la validation, à partir de mesures sol gravimétriques et GPS, des mesures de gravimétrie spatiale de type GRACE. Son second objectif, et non des moindres puisqu'il fait le lien avec la composante hydrologique de AMMA, est une comparaison entre modèles et observations multidisciplinaires des variations de stock d'eau en Afrique de l'Ouest. Dans le cadre de ce programme, une station GPS permanente supplémentaire a été installée à l'Est du Niger, à Diffa. Les stations GPS AMMA devraient apporter une information sur le terme saisonnier des déformations du sol liées à l'hydrologie, dont l'amplitude atteint 4 mm à Djougou sur la composante verticale, 3 mm à Niamey contre moins de 1 à Tamanrasset, d'après les modèles.

IV Evolution thématique : positionnement sous marin et surface de la mer

Au vu de l'élargissement spectaculaire du champ des applications du GPS dans la dernière décennie, il était logique que l'on cherche à le faire aller au delà des applications sur la terre ferme. Après tout, plus de deux tiers de la surface de la planète sont recouverts d'eau, et ces domaines océaniques présentent autant d'intérêt si ce n'est plus que les continents en ce qui concerne la géophysique et la météo.

L'essentiel des zones de déformation active est situé en mer. Les zones de subduction, en particulier, qui concentrent l'activité sismique la plus intense, déformation verticale, activité volcanique et cycles sismiques très courts, donc plus simples à étudier, vont de pair avec les fosses sous marines les plus profondes. Il est assez frustrant de ne pas avoir accès à ces domaines, alors même qu'on sait que les déformations que l'on peut mesurer à terre s'y prolongent et s'y intensifient. La limitation est bien évidemment l'imperméabilité du milieu marin aux ondes électromagnétiques. Le seul vecteur utilisable pour la mesure de distances, donc potentiellement pour le positionnement, est le signal acoustique. Si l'on ne s'intéresse qu'à la composante verticale, une autre possibilité réside dans la mesure de hauteur d'eau, grâce à des

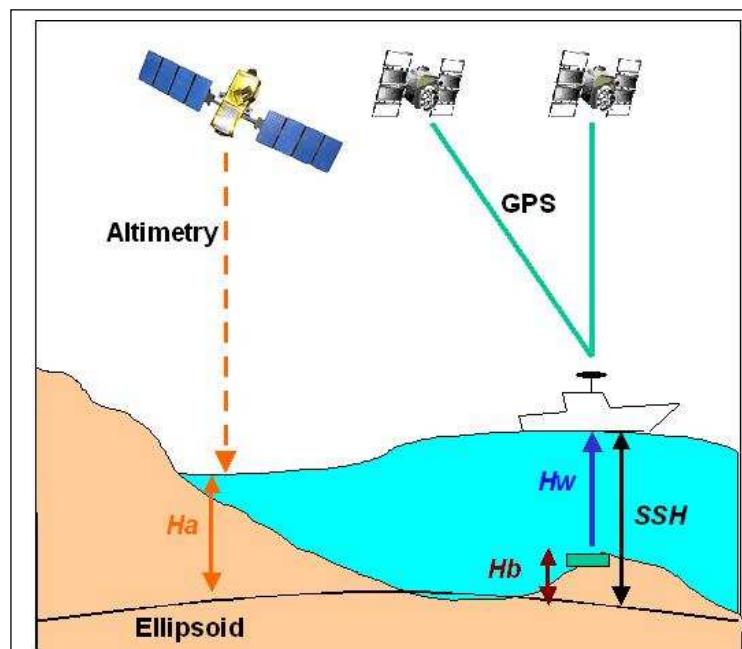


Figure 20 : Principe des mesures de hauteur en fond de mer : la valeur que l'on cherche à mesurer est H_b , hauteur ellipsoïdale du repère, qui est aussi SSH moins H_w (mesurée par le capteur de pression. On peut mesurer directement SSH par GPS, ou bien utiliser la mesure H_a sur la trace altimétrique la plus proche, à condition de connaître la différence H_a-SSH (Bouin *et al.*, 2009a).

mesures de pression par exemple. Il faut donc imaginer une combinaison de positionnement classique en surface et de mesures acoustiques ou de pression sous l'eau. La difficulté, on le voit tout de suite, va être d'obtenir un positionnement GPS précis sur une surface aussi mouvante que l'est celle de la mer.

Je présente ici dans un premier temps le principe de la géodésie sous marine et les résultats qu'on a obtenus dans ce domaine ; dans un deuxième temps la façon dont on peut utiliser le GPS comme instrument de cartographie de la surface de la mer.

IV-1 Du GPS à la géodésie sous marine

Contexte

Compte tenu des proportions respectives de surface de la Terre émergées et couvertes d'eau, il était logique que les géodésiens s'intéressent au positionnement sous marin précis : la réalisation des systèmes de référence est représentée par un petit tiers de la surface de la planète, et on sait que l'essentiel de la déformation est concentré sur les océans. Plusieurs équipes ont utilisé une combinaison de mesures GPS et acoustiques pour déterminer, de manière la plus précise possible, la position d'un point isolé dans un système global (Spiess *et al.*, 1998 ; Obana *et al.*, 2000 ; Gagnon *et al.*, 2005). Mesurer la déformation selon la composante verticale uniquement devient, paradoxalement, plus facile en milieu marin que de chercher un positionnement tri dimensionnel : on peut se contenter de mesures de pression pour déterminer la hauteur d'eau et ses variations. C'est la piste qu'ont suivie plusieurs équipes pour l'étude de zones de déformations volcaniques intenses situées entre 1500 et 2000 m de profondeur (Fox, 1993 ; Chadwick Jr. *et al.*, 2006). C'est la piste que nous avons également choisie, avec un chantier qui s'imposait de lui-même : on a vu (partie II-1) qu'à l'Ouest de l'île de Santo, quand on se rapproche de la fosse de subduction, on observe de la surrection alors que les modèles élastiques donnent de la subsidence. La question est de savoir si, à proximité de la fosse (à quelle distance ?) cette surrection (qui s'explique vraisemblablement par l'arrivée de la Ride d'Entrecasteaux dans la subduction) finit par s'inverser. On dispose de vitesses verticales fiables sur les îles, au plus près de la fosse, il restait à prolonger le réseau en mer. Par ailleurs, à l'Ouest de Santo, se trouvent deux hauts fonds, l'un sur le banc Sabine, qui est situé sur la plaque plongeante (Australie), l'autre sur le banc Wusi sur le bloc central du Vanuatu (figure 23). Ces deux hauts fonds d'une douzaine de mètres de profondeur sont équipés, depuis 1999, de capteurs de pression continus qui sont relevés tous les 18 mois par des plongeurs. On suppose ici que le banc Sabine est stable verticalement, et on cherche à mesurer les variations relatives de hauteur de Wusi. Pour cela, il faut connaître les hauteurs de la surface marine au dessus des deux marégraphes, et leur variation dans le temps. Cela devrait être accessible en théorie à partir des données d'altimétrie satellitaire, mais on s'aperçoit vite que la résolution (encore limitée ici par la présence des îles) est insuffisante pour cartographier les ondulations avec précision, et que les variations temporelles de hauteur

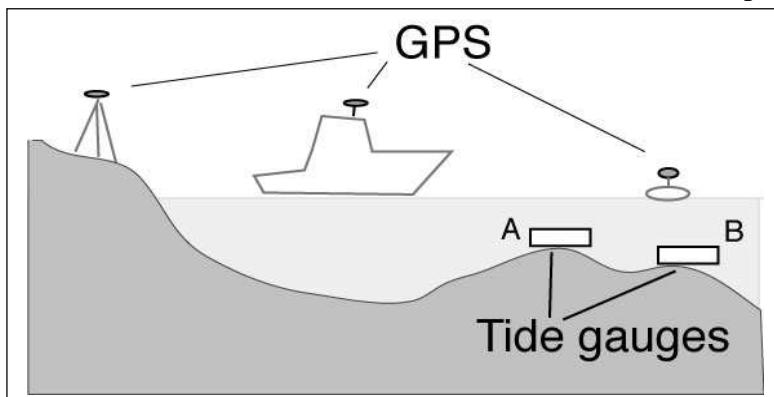


Figure 21 : Principe du test de répétabilité de géodésie fond de mer réalisé à Sarami, Est Santo (Ballu *et al.*, 2009).

depuis 1999, de capteurs de pression continus qui sont relevés tous les 18 mois par des plongeurs. On suppose ici que le banc Sabine est stable verticalement, et on cherche à mesurer les variations relatives de hauteur de Wusi. Pour cela, il faut connaître les hauteurs de la surface marine au dessus des deux marégraphes, et leur variation dans le temps. Cela devrait être accessible en théorie à partir des données d'altimétrie satellitaire, mais on s'aperçoit vite que la résolution (encore limitée ici par la présence des îles) est insuffisante pour cartographier les ondulations avec précision, et que les variations temporelles de hauteur

d'eau, données en principe par les SLA (Sea Level Anomalies) le long des traces, sont très inexactes. On utilise donc le GPS comme instrument de mesure instantanée de la surface marine (figure 20).

Résultats

La mise au point de la technique s'est faite en 2 temps. Dans un premier temps, on a utilisé l'opportunité d'installer et de mesurer un réseau de répétition en fond de mer, à grande profondeur, sur le site du volcan Lucky Strike, sur le chantier MoMAR des Açores. La campagne Graviluck, en 2006, a permis de pratiquer sur l'ensemble de ce réseau mesures de pression et de gravimétrie, et d'installer une jauge de pression permanente sur un site (**Ballu et al., 2009a**). Une étude d'incertitude de mesures a permis de montrer que ce type de mesures de pression permettait d'observer une variation de profondeur (correspondant à un déplacement vertical) de 1 cm environ (**Ballu et al., 2009a**).

Par la suite, une étude plus complète sur le site protégé de Sarami, à l'Est de Santo, a permis de quantifier la répétabilité que l'on peut obtenir sur la mesure de hauteur ellipsoïdale absolue

(dans l'ITRF) de deux sites en fond de mer (**Ballu et al., 2009b**). On a installé en 2004 deux repères proches à faible profondeur (entre 16 et 17 m), dans un environnement stable du point de vue tectonique. On a mesuré pendant plusieurs heures leur profondeur à l'aide de capteur de pression, et la hauteur ellipsoïdale de la surface de la mer à l'aplomb du site avec un GPS installé sur une bouée et sur le navire Alis (figure 21). Les mesures de pression ont été effectuées successivement sur les deux sites pour simuler les conditions

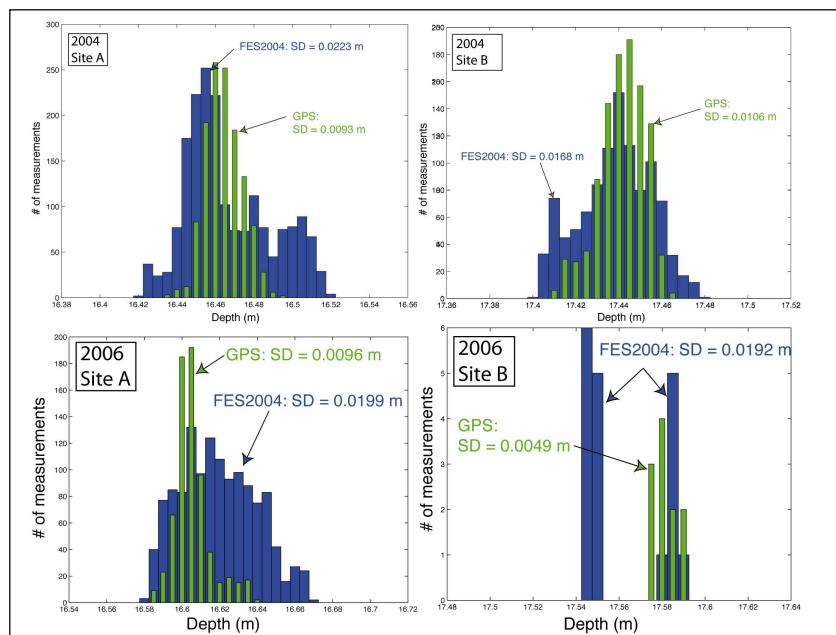


Figure 22 : Histogrammes des profondeurs mesurées par capteur de pression sur 2 sites à Sarami (A à gauche, B à droite) en 2004 (haut) et 2006 (bas), selon que les mesures sont corrigées de la marée avec le modèle FES2004 (bleu) ou à partir des mesures GPS se surface (vert). Les profondeurs et les écarts-type (SD) sont indiqués en m (**Ballu et al., 2009**).

d'une mesure de répétition. Le même type de mesures a été effectué 2 ans plus tard, en 2006, sur les mêmes sites et avec les mêmes instruments. Les répétabilités sur ces mesures de hauteur ellipsoïdales sont excellentes (sub centimétriques, voir le tableau ci après) confirmant que le facteur limitant la précision de la géodésie fond de mer, au moins sur la mesure de hauteur, est bien la précision des mesures GPS de surface – ici, les conditions de mer sont particulièrement favorables et une station de référence a été installée à moins d'un kilomètre.

Année/Site	A	B	Différence 1	Différence 2
2004	48.776±0.01	47.798±0.010	0.09692±0.004	0.977±0.014
2006	48.778±0.012	47.806±0.05	0.967±0.007	0.972±0.012

Tableau 1 : Comparaison des hauteurs ellipsoïdales des repères de géodésie fond de mer A et B mesurés en 2004 et 2006, et de leurs différence (en m). La différence 1 correspond à la différence de pression, corrigée ensuite des variations de hauteur d'eau mesurée par GPS, alors que la différence 2 est la différence des hauteurs ellipsoïdales de A et B (Ballu *et al.*, 2009).

La même étude montre que les mesures GPS sont nécessaires aussi bien pour corriger les anomalies de hauteur d'eau (la différence de hauteur ellipsoïdale de la surface SSH – figure 20 – entre 2004 et 2006 est de 20 cm, alors qu'on voit que la hauteur des repères au fond sont cohérentes à quelques millimètres près) que pour corriger des effets de marée. En effet, à l'intérieur d'une même session de mesures, l'incertitude sur la profondeur mesurée par un capteur de pression se réduit systématiquement et significativement si l'on corrige les effets de marée à partir des mesures GPS plutôt qu'avec le modèle FES2004 (Lyard *et al.*, 2006), voir la figure 22.

Perspectives

Ces résultats, pour limités qu'ils soient, montrent bien que la mesure géodésique en fond de mer est possible, en tout cas pour la détermination de hauteurs ellipsoïdales. La suite consiste bien évidemment à transposer la démonstration qui a été faite dans le cadre favorable de Sarami à un environnement moins protégé, de manière à mesurer les déformations qui, elles, sont probablement significatives sur la zone de Wusi. Les sessions de mesures simultanées de pression et de hauteur ellipsoïdales GPS de la surface de la mer (SSH) sur Wusi étaient jusqu'à présent trop limitées pour en déduire des résultats exploitables. Ce n'est qu'une question de temps, et les résultats de la dernière campagne de mesures, en 2009, devraient déjà permettre de déduire une tendance.

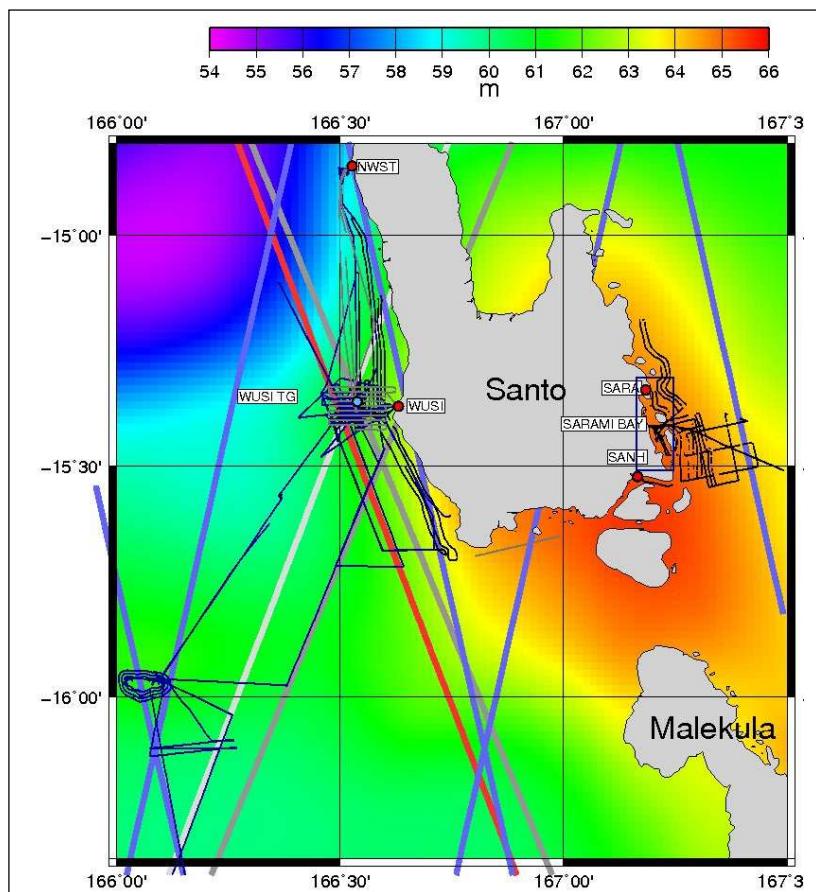


Figure 23 : Carte de la SMO autour de Santo, d'après DNSC08 (Andersen & Knudsen, 2008), en m. Les points rouges indiquent les stations GPS fixes qui ont été utilisées, le point bleu clair le marégraphe du banc Wusi. On a également indiqué diverses traces de satellites altimétriques (T/P2, Jason, ERS et GFO) et les trajectoires du bateau en 2004 (noir), 2006 (bleu) et 2007 (gris) (Bouin *et al.*, 2009a).

IV-2 Le GPS comme complément à l'altimétrie

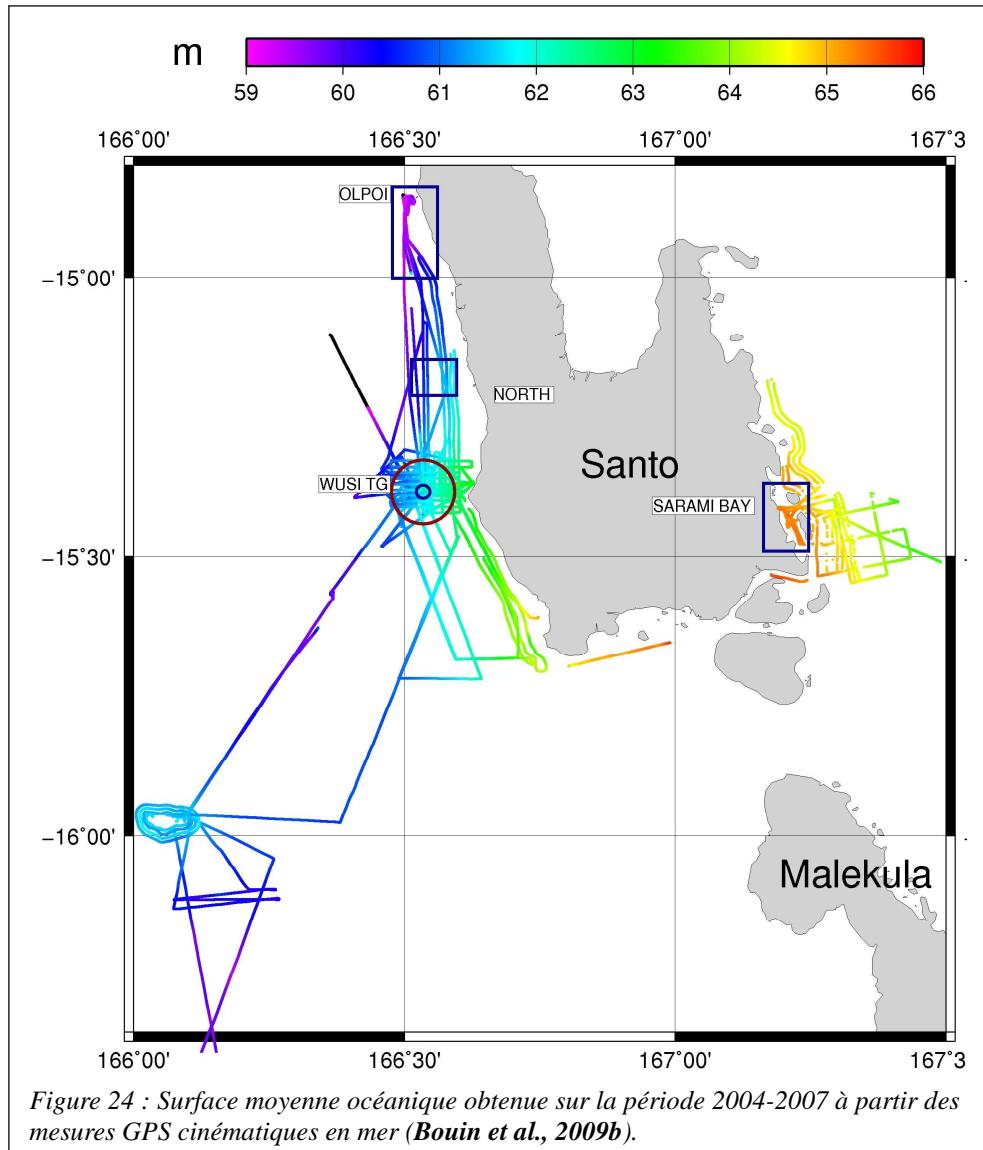
Un des facteurs limitant le type d'expérience précédemment décrit est justement la nécessité de devoir mesurer régulièrement, à l'aide de GPS, la hauteur ellipsoïdale de la surface à l'aplomb du marégraphe. Cela justifie des campagnes coûteuses en temps bateau et en personnel, pour une précision effective de mesure de hauteur par GPS, on va le voir, qui descend rarement en dessous de 10 cm. Parallèlement à cela, les capteurs de pression mesurent de manière continue et ne nécessitent des relèves (pour changement des piles et récupération des données) que tous les 3 à 4 ans. Il serait donc souhaitable de disposer de mesures de la hauteur de la surface également continues et indépendantes des campagnes en mer. La réponse vient évidemment de l'altimétrie spatiale, qui revendique une précision sur la mesure de la surface moyenne océanique (SMO) de quelques centimètres, fournit des mesures le long des traces tous les 7 à 10 jours, et couvre assez bien (voir figure 23) la zone d'étude. Les données le long des traces incluent les variations temporelles de hauteur de la mer (anomalies de surface de la mer, incluant la topographie dynamique et les effets atmosphériques) et devraient permettre d'obtenir, à partir des séries temporelles continues de pression, des séries également continues de hauteur ellipsoïdale du fond.

Source d'erreur (cm)	Bateau			Correction	Bouée			Correction
	2004	2006	2007		2004	2006	2007	
Bruit GPS	0.8	1.2	0.8	-	0.8	1.2	0.8	-
Etat de mer	18.0 ± 10.4	26.5 ± 15.2	12.5 ± 9.2	MRU/Filtrage	24.7 ± 3.0 7.8 ± 1.8 ^a	26.5 ± 29.1	10.2 ± 4.6	Filtrage
Incertitude HF ^b	7.0 ± 5.0	11.1 ± 7.9	5.6 ± 6.8		ND	ND	ND	
Correction de marée	3.5	5.0	3.6	Mesures marégraphiques	3.5	5.0	3.6	Mesures marégraphiques
Hauteur d'antenne	3.5	3.5	3.5	Vérification	0.5	0.5	0.5	-
Vitesse du bateau	6	6	6	Modélisation	-	-	-	-
Erreur totale basse fréquence	7.8 ^d 10.5 ^e	8.6 14.01	7.8 9.6		ND	ND	ND	
Incertitude totale (pts de croisement)	10.2	14.0	12.5		10.4 9.1	9.7 3.6	6.1	
Tableau 2 : Récapitulatif des sources d'erreur GPS cinématiques en mer sur les campagnes autour de Santo, 2004 à 2007 (Bouin et al., 2009a).								

Contexte

Le problème vient d'une part des limitations de l'altimétrie sur cette zone (chapelet d'îles qui limite l'accroche, donc la couverture des traces et la précision des mesures), d'autre part des fortes ondulations du géoïde sur la zone par rapport à la résolution des SMO satellitaires. La figure 23 permet de constater qu'à l'Ouest de Wusi, la pente de la SMO atteint 17 cm par kilomètre.

Même si plusieurs traces satellitaires sont situées à proximité immédiate du banc Wusi, une différence de quelques 10 cm entre la hauteur Ha vue par l'altimétrie et la hauteur SSH à l'aplomb exact du marégraphe va se reporter directement sur l'exactitude de la hauteur du repère. Il est donc nécessaire d'obtenir au moins localement une SMO suffisamment précise et bien



ré solue pour ne pas dégrader la précision de la mesure de hauteur fond de mer. Les deux outils appropriés pour cela sont probablement la gravimétrie marine et le GPS cinématique. Compte tenu des contraintes importantes liées aux missions en mer Geodeva sur la zone (état de mer, disponibilité du bateau, temps et logistique limités), on a choisi d'utiliser le GPS cinématique pour couvrir de manière systématique et répétée la zone autour du banc Wusi et jusque sous les traces altimétriques environnantes (figure 23). L'objectif était de : 1) mettre au point une méthodologie de traitement GPS cinématique en mer en tenant compte de l'environnement spécifique de la zone ; 2) à partir de ces données GPS, évaluer la précision et la résolution des SMO existantes et construire une SMO locale améliorée.

Résultats

Puisque c'est la précision de la mesure de hauteur ellipsoïdale de la surface de la mer par GPS qui vient limiter la précision du positionnement vertical que l'on peut obtenir en fond, il convient d'évaluer cette précision dans les conditions réelles de mesure (donc sur la zone d'étude), de lister les différentes sources d'erreur et si possible de proposer une méthodologie adaptée. Nous avons utilisé ici les données GPS enregistrées à bord de l'Alis et avec une bouée GPS, lors de campagnes en mer (d'une à deux semaines chacune) en 2004, 2006 et 2007. Les trajectoires du bateau sont celles de la figure 23 (**Bouin et al., 2009a**).

Nous avons distingué, dans notre étude méthodologique, les facteurs d'erreur hautes fréquences (comme l'état de mer, qui provoque un mouvement haute fréquence du bateau) et ceux à plus longue période, comme l'erreur sur les corrections de marée. Le tableau 2 présente un bilan de ces sources d'erreur, avec les incertitudes qui en résultent, à hautes fréquences et totale. Les conditions de mesures varient d'une année à l'autre, mais la hauteur moyenne significative des vagues est systématiquement proche de 1,50 m. Les levés se sont effectués jusqu'à 100 km des côtes, avec des hauteurs de vagues significatives jusqu'à 2,50 m. On montre que l'essentiel de l'erreur haute fréquence sur la mesure verticale GPS vient de l'état de mer. On a considéré ici que le bruit GPS proprement dit (évalué à partir de sessions de mesures cinématiques lorsque le bateau est à un mouillage calme) et le bruit dû à l'état de mer sont statistiquement indépendants, ce qui est probablement faux : il semble logique que des mouvements rapides du bateau, donc de l'antenne GPS, réduisent le nombre de données enregistrées et augmentent la fréquence des sauts de cycle, donc dégradent la précision finale en sus du mouvement apparent. Cette erreur due à l'état de mer, qui est quantifiable indépendamment du GPS en utilisant les enregistrements de la centrale d'attitude (MRU) du bateau, est corrigable toujours à partir de ces enregistrements et/ou d'un filtre hautes fréquences. L'erreur équivalente sur la bouée GPS ne peut être corrigée que si la bouée est équipée d'un capteur d'attitude, ce qui n'était pas notre cas.

Les erreurs basses fréquences, pour la bouée GPS, sont principalement dues aux incertitudes sur les modèles de marée. Nous les avons quantifiées en comparant une reconstruction du signal de marée à partir des données du marégraphe de Wusi au modèle FES2004. Les mesures GPS ont ensuite été corrigées à partir de la reconstruction de marée. Pour le bateau, il faut tenir compte de ses déplacements et de la variation de marée qui en résulte. Nous avons utilisé pour cela la variation spatiale de marée vue par FES2004, ajoutée à la reconstruction sur le site de Wusi. Cette erreur de modèle de marée ne représente plus qu'un tiers des erreurs basses fréquences.

Viennent s'y ajouter l'incertitude sur la hauteur de l'antenne GPS du bateau (mesurée pendant des séances d'étalonnage) et un changement de l'attitude du bateau (donc de la hauteur de l'antenne) en fonction de sa vitesse. Il est donc recommandé de procéder à des séances d'étalonnage de cette variation de hauteur, en faisant varier la vitesse du bateau dans un contexte local. Au final, la somme de ces différents termes d'erreur hautes et basses fréquences est cohérente avec l'incertitude estimée par la méthode des points de croisement et varie de 10 à 14 cm selon les campagnes. Cet écart type fournit une borne supérieure de l'exactitude de la mesure de hauteur ellipsoïdale par GPS sur cette zone (puisque l'écart aux points de croisement est, lui, inférieur à 1,5 cm). Il est supérieur à l'incertitude théorique sur

SMO	Ecart moyen (m)	RMS (m)
DNSC08	$0,070 \pm 0,263$	0,273
CLS01	$0,039 \pm 0,435$	0,437
CTOH	$0,250 \pm 0,503$	0,562
EGM08	$0,062 \pm 0,201$	0,211

Tableau 3 : Comparaison (écart moyen et RMS, en m) entre la surface moyenne obtenue par GPS autour de Santo et diverses SMO altimétriques ou gravimétriques (**Bouin et al., 2009b**).

les mesures de hauteur de surface issues de l'altimétrie satellitaire, mais, on va le voir, bien inférieur à l'exactitude réelle de ces hauteurs sur les zones proches des côtes.

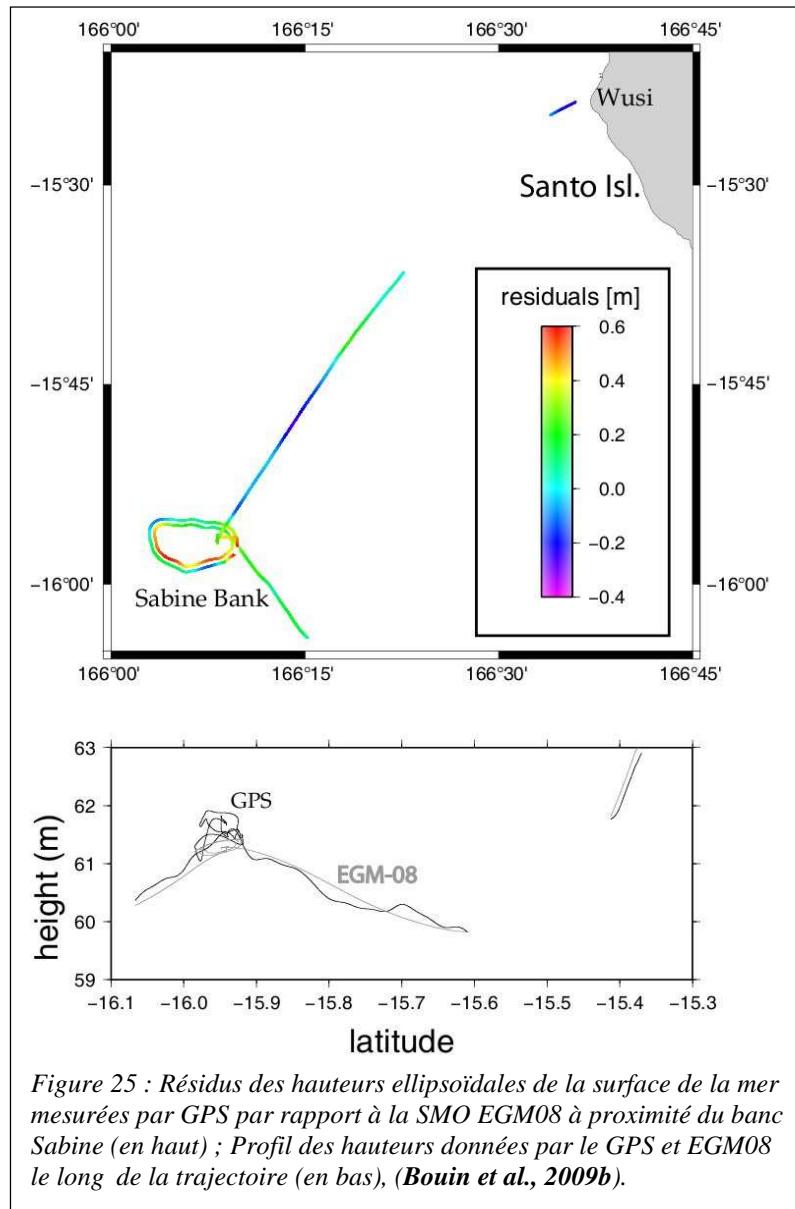


Figure 25 : Résidus des hauteurs ellipsoïdales de la surface de la mer mesurées par GPS par rapport à la SMO EGM08 à proximité du banc Sabine (en haut) ; Profil des hauteurs données par le GPS et EGM08 le long de la trajectoire (en bas), (Bouin et al., 2009b).

données de gravimétrie terrestre et spatiale (GRACE). La comparaison démontre très clairement la supériorité de la surface EGM08 utilisant des informations gravimétriques – voir tableau 3. Les surfaces moyennes purement altimétriques manquent de résolution sur la zone, à cause de la présence des îles, et échouent à reproduire les ondulations haute résolution du géoïde. Les biais de hauteur sont particulièrement sensibles près des côtes, zones mal couvertes par l'altimétrie et où le géoïde « remonte » à cause de la topographie marquée. On observe ainsi des écarts de -40 cm à 1 m avec les surfaces purement altimétriques, et de -28 cm à 25 cm avec la surface EGM08. La topographie sous marine du banc Sabine par exemple (voir figure 25) qui remonte de plus de 2000 m jusqu'à 5 m sous la surface et provoque une ondulation de la surface moyenne de plus d'1 m, est insuffisamment résolue par la surface EGM08 (Bouin et al., 2009b).

Nous avons utilisé ces mesures bateau pour construire une surface océanique moyenne combinée sur les différentes campagnes, restreinte aux zones couvertes par le bateau (figure 24, Bouin et al., 2009b). La précision de cette surface combinée purement GPS est estimée à 10 cm (écart maximal entre les années sur une même zone). Cette surface a ensuite été utilisée pour évaluer la précision des SMO altimétriques sur la zone. Pour obtenir une surface homogène sur les 3 ans, les anomalies de niveau de la mer ont été corrigées à partir des données altimétriques fournies par Aviso/CLS et le CTOH. Les surfaces comparées sont CLS01 (Hernandez & Schaeffer, 2001), une surface locale fournie par le CTOH (Birol et al., 2006), DNSC08 (Andersen & Knudsen, 2008) et la surface EGM08 qui inclut en plus des données altimétriques le modèle de champ de gravité EGM08 (Pavlis et al., 2008) et des

Perspectives

Nous avons démontré la faisabilité des mesures de géodésie de fond de mer sur la composante verticale, à condition de disposer de mesures GPS de la hauteur de la surface de la mer de précision suffisante. Mieux, l'utilisation des mesures de campagnes successives, sur 3 années, pour en déduire une SMO précise localement devrait permettre de s'affranchir très largement des mesures GPS en mer. L'objectif des prochaines années sera de quantifier la déformation verticale sur le banc Wusi, à l'aide des mesures de pression continues et de l'altimétrie satellitaire. La répétition plus espacée des campagnes GPS en mer doit permettre d'assurer la relève des marégraphes sur le long terme (ainsi que du marégraphe côtier qui a été installé en 2007 à proximité de Wusi) mais aussi de fournir ponctuellement des références de hauteur, pour détecter des sauts cosismiques par exemple. La cinquième campagne en mer sur la zone a été demandée pour 2010.

Les sites de Wusi et Sabine sont aussi adaptés à de l'étalonnage de capteur d'altimétrie satellitaire, puisque situés à proximité de points de croisement de diverses traces (dont Jason 2).

V Conclusion et perspectives

Cette habilitation marque pour moi la fin de mon aventure avec la mesure de déformations de la croûte terrestre. Mon entrée à Météo France s'accompagne d'une réorientation thématique qui, si je ne l'ai pas expressément souhaitée, me satisfait par les nouveaux domaines (scientifiques et humains) dont elle m'ouvre les portes. Je me réjouis d'avoir pu contribuer modestement aux progrès (nombreux) de la géodésie spatiale et de ses applications, ainsi que des ouvertures et rencontres que ces 10 ans de recherche en collaboration ont suscitées.

J'espère que la communauté « géodésie-géophysique » française saura continuer à faire preuve du même dynamisme, de la même curiosité et de la même exigence. C'est un domaine fragile puisqu'il repose sur la bonne volonté de nos tutelles à financer des observatoires, des instruments et des campagnes d'observations, et les moyens humains qui les accompagnent. C'est une discipline parfois ingrate, car les résultats (souvent peu médiatiques) n'apparaissent qu'après des années, voire des décennies d'observation, de mise au point (pour ne pas dire de tâtonnements) et d'acharnement sur le traitement et sur l'interprétation des résultats bruts. J'espère donc que la recherche publique française fera preuve d'assez de discernement et de confiance dans ses laboratoires pour continuer à financer la mesure de déformations et les activités de recherche qui l'accompagnent.

Références bibliographiques citées dans le texte

Altamimi, Z., Boucher, C., & Sillard, P. (2002) ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *J. Geophys. Res.* 107(B10), 2214, doi: 10.1029/2001JB000561.

Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B. & Boucher, C. (2007a) ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J.Geophys. Res.*, 112, B09401, doi: 10.1029/2007JB004949.

Altamimi, Z., Sillard, P., & Boucher, C. (2007b) CATREF software: Combination and analysis of terrestrial reference frames, Release and Documentation of May 2007, Institut Géographique National, Paris, France.

- Amalvict, M., Hinderer, J., Calais, E., Exertier, P., Walch, J.J., Lalancette, M.F., Florsch, N. & Llubes, M. (2001) Time stability of gravity at different sites in France, IAG Symposia, vol. 123, M. Sideris (ed.), Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, Springer Heidelberg, 199-203.
- Andersen, O. & Knudsen, P. (2008) The DNSC08 global Mean sea surface and Bathymetry, presented at EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Argus, D.F. & Heflin, M.B. (1995) Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the global positioning system, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1973–1976.
- Ballu, V., J. Ammann, O. Pot, O. de Viron, G. Sasagawa, G. Reverdin, M.N. Bouin, M. Cannat, C. Deplus, S. Deroussi, M. Maia & M. Diament, (2009a) A seafloor experiment to monitor vertical deformation at the Lucky Strike volcano, Mid-Atlantic Ridge, *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-008-0248-3.
- Ballu, V., MN Bouin, S. Calmant, E. Folcher, JM. Bore, J. Ammann, O. Pot, M. Diament & B. Pelletier, (2009b) Obtaining centimeter level submarine benchmark heights by combining tide gauge and kinematic GPS data, *J. of Geodesy*, en révision.
- Barbot S., Hamiel, Y., & Fialko, Y. (2008) Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 M w 7.2 Altai earthquake: Implications for the local lithospheric rheology, *J. Geophys. Res.*, 113, B03403, doi:10.1029/2007JB005063.
- Bastin S., Champollion, C., Bock, O., Drobinski, P., & Masson, F. (2005) On the use of GPS tomography to investigate water vapor variability during a Mistral/sea breeze event in southeastern France, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05808, doi:10.1029/2004GL021907.
- Beavan, J. (2005) Noise properties of continuous GPS data from concrete pillar geodetic monuments in New Zealand and comparison with data from U.S. deep drilled braced monuments, *J. Geophys. Res.*, 110, B08410, doi:10.1029/2005JB003642.
- Bergeot, N., M.N. Bouin, M. Diament, B. Pelletier, M. Régner, S. Calmant, & V. Ballu, (2009) Interseismic velocity field in the central Vanuatu locked subduction zone context from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2007JB005249.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R., & Ware, R. (1992), GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 97(D14), 15787-15801.
- Bevis, M., S. Businger, S. Chiswel, T. H. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, & R. H. Ware (1994) GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *Journal of applied meteorology*, 33, 379-386.
- Bilich A., K. Larson & P. Axelrad (2004) Observations of Signal-to-Noise Ratios (SNR) at geodetic site CASA: Implications for Phase Multipath, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique*, Volume 23.
- Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L.D., & A. Unnikrishnan, A., (2007) Observations: Oceanic climate and sea level, In: Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA.
- Birol F., Roblou L., Lyard F., Llovel W., Durand F., Renault L., Dewitte B., Morrow R., & Ménard Y. (2006) Towards using satellite altimetry for the observation of coastal dynamics. Symposium "15 Years of Progress in Radar Altimetry", Venice, Italy.
- Blewitt G., & D. Lavallée (2002), Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107 (B7), 2145, doi:10.1029/2001JB000570.
- Bock, O., C. Keil, E. Richard, C. Flamant & M.N. Bouin, (2005) Validations of precipitable water from ECMWF model analyses with GPS data during the MAP SOP, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol. 131, Part B No. 612.
- Bock, O., M-N Bouin, A. Walpersdorf, J.P. Lafore, S. Janicot & F. Guichard, (2007) Assessment of GPS data for meteorological applications over Africa: analysis of precipitable water vapour, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, doi:10.1002/qj.185.
- Bock, O., M.N. Bouin, E. Doerflinger, P. Collard, F. Masson, R. Meynadier, S. Nahmani, M. Koité, K. Gaptia Lawan Balawan, F. Didé, D. Ouedraogo, G. Wilson, F. Guichard, S. Janicot, J.P. Lafore & M. Nuret

- (2008), The West African Monsoon observed by ground-based GPS receivers during the AMMA project, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD010327.
- Boehm, J., Werl B. and H. Schuh (2006a) Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from ECMWF operational analysis data, *J. of Geophys. Res.*, 111, B02406, doi: 10.1029/2005JB003629.
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H., (2006b) Global mapping function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Bougeault P., Binder, P., Buzzi, A., Dirks, R., Houze, R., Kuettner, J., Smith, R.B., Steinacker, R, & Volkert, H., (2001) The MAP Special Observing Period, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, 433-462.
- Bouin, M.N. & C. Vigny, (2000) New constraints on Antarctic plate motion and deformation from GPS data, *Journal of Geophys. Res.*, 105 B 12, pp 28279-28294.
- Bouin, M.N., V. Ballu, S. Calmant, B. Pelletier, J.M. Boré, E. Folcher & J. Ammann, (2009a) Methodology of kinematic GPS experiment for local sea surface mapping, Vanuatu, *J. of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-009-0338-x.
- Bouin, M.N., V. Ballu, S. Calmant & B. Pelletier, (2009b) Improving resolution and accuracy of Mean Sea Surface from kinematic GPS, Vanuatu Subduction Zone. *J. of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-009-0320-7.
- Bouin, M.N., & G. Wöppelmann, (2009) Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation, *Geophys. J. Int.*, sous presse.
- Boy, J.P., Llubes, M., Hinderer, J., & Florsch, N., (2003) A comparison of tidal ocean loading models using superconducting gravimeter data, *J. Geophys. Res.*, 108, 2193, doi:10.1029/2002JB002050.
- Brenot, H., V. Ducrocq, A. Walpersdorf, C. Champollion & O. Caumont, (2006) GPS zenith delay sensitivity evaluated from high resolution NWP simulations of the 8-9th September 2002 flash-flood over southeastern France, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, D15105, doi:10.1029/2004JD005726.
- Businger, S., S.R. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. Anthes, C. Rocken, R. Ware, M. Exner, T. VanHove, & F. Solheim, (1996) The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 77, 5-18.
- Calmant, S., Pelletier B., Lebellegard P., Bevis M., Taylor F.W., & Phillips D.A. (2003), New insights on the tectonics along the New Hebrides subduction zone based on GPS results, *J. Geophys. Res.*, 10(B6), doi:10.1029/2001JB000644.
- Cabanes C., Cazenave A. & Le Provost C. (2001) Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations, *Science* 294, 840-842.
- Cazenave, A. & Nerem, R., (2004) Present-day sea-level change: observations and causes, *Reviews of Geophysics*, 42, RG3001.
- Chadwick Jr., WW, Nooner, SL, Zumberge, MA, Embley, R, & Fox, CG (2006) Vertical deformation monitoring at Axial Seamount since its 1998 eruption using deep-sea pressure sensors *J. Volc. Geoth. Res.* 150: 313-327.
- Champollion, C., F. Masson, M.-N. Bouin, A. Walpersdorf, E. Doerflinger, O. Bock & J. Van Baelen, (2005) GPS Water Vapour Tomography: First results from the ESCOMPTE Field Experiment, *Atmospheric Res.*, Vol 74, Iss. 1-4, pp. 253-274.
- Champollion, C., C. Flamant, O. Bock, F. Masson, D.D. Turner & T. Weckwerth, (2009) Mesoscale GPS tomography applied to the 12 June 2002 convective initiation event of IHOP 2002, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*
- Church, J., Gregory, J.A., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D., & Woodworth, P.L., (2001) Changes in sea level. In Climate change 2001: the scientific basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J.T. Houghton et al., pp. 639-693, Cambridge Univ. Press, New York.
- Church, J. & White, N., (2006) A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826.

- Collilieux, X., Altamimi, Z., Ray, J., van Dam, T. & Wu, X., (2009) Effect of the satellite laser ranging network distribution on geocenter motion estimation, *J. Geophys. Res.*, 114, B04402, doi:10.1029/2008JB005727.
- Collilieux, X., & Wöppelmann, G., (2009) Impact du système de référence terrestre sur la montée du niveau moyen des mers par marégraphie, Publications du LAREG série memorandum, MM25.
- Cros, B., P. Durand, H. Cachier, Ph. Drobinski, E. Fréjafon, C. Kottmeier, P. E. Perros, V. -H. Peuch, J. -L. Ponche, D. Robin, F. Saïd, G. Toupanc, & H. Wortham, (2004) The ESCOMPTE program : an overview, *Tropospheric Research*, Volume 69, Issues 3-4.
- Douglas, B.C., (1991) Global sea level rise. *J. Geophys. Res.*, 96 (C4), 6981--6992.
- Douglas, B.C., (1997) Global sea level rise: a redetermination. *Surv. Geophys. Res.*, 18, 279--292.
- Douglas, B.C., (2001) Sea level change in the era of the recording tide gauge., In *Sea Level Rise: History and Consequences*, International. Geophysics Series, 75, edited by B. Douglas, M. Kearney & S. Leatherman, chap. 3, 37--64, Academic, San Diego, California.
- Dow, J.M., Neilan, R.E. & Gendt, G., (2005) The International GPS Service: celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade, *Advances in Space Research*, 36, 320--326.
- Emardson, T. R., Elgered, G., & Johansson, J. M., (1998) Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of Global Positioning System receivers , *J. Geophys. Res.* Vol. 103 , No. D2 , 1807-1820.
- Fang, P., M. Bevis, Y. Bock, S. Gutman, & D. Wolfe (1998), GPS Meteorology: Reducing Systematic Errors in Geodetic Estimates for Zenith Delay, *Geophys. Res. Lett.*, 25(19), 3583-3586.
- Ferland, R., (2003) IGSMail 4748, 4758 and 4666, available at <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmai/2003/maillist.html>.
- Ferland, R., (2005) Igb00 review GOUG-YAKT, IGSSTATION-352 of Dec. 31, 2005, available at <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsstation/2005/msg00035.html>.
- Flores, A., G. Ruffini, & A. Rius, (2000) 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays, *Annales Geophysicae*, 18, 223-234.
- Fox C (1993) Five years of ground deformation monitoring on axial seamount using a bottom pressure recorder *Geophys. Res. Lett.* 20: 1859-1862
- Fritzsche, M., R. Dietrich, C. Knöfel, A. Rülke, S. Vey, M. Rothacher, & P. Steigenberger (2005), Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L23311, doi:10.1029/2005GL024342.
- Gagnon K, Chadwell CD & Norabuena E (2005) Measuring the onset of locking in the Peru-Chile trench with GPS and acoustic measurements *Nature* 434: 205-208
- Ge, M., Gendt, G. , Dick, G., Zhang, F.P. & Reigber, C., (2005) Impact of GPS satellite antenna offsets on scale changes in global network solutions. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06310, doi: 10.1029/2004GL022224.
- Gradinarsky, L, (2002) Sensing atmospheric water vapor using radio waves, PhD Thesis, Department of Radio and Space Science, School of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suède.
- Gutman, S.I., Sahm, S.R., Benjamin, S.G., Schwartz, B.E., Holub, K.L., Stewart, J.Q. & Smith, T.L. (2004) Rapid Retrieval and Assimilation of Ground Based GPS Precipitable Water Observations at the NOAA Forecast Systems Laboratory: Impact on Weather Forecasts, *J. Meteorol. Soc. J.*, Vol. 82, 351-360.
- Haase, J.S., M. Ge, H. Vedel, & E. Calais, (2003) Accuracy and Variability of GPS Tropospheric Delay Measurements of Water Vapor in the Western Mediterranean, *J. Appl. Meteor.*, 1547-1568.
- Hernandez F., & Schaeffer P. (2001) The CLS01 mean sea surface: A validation with the GSFC00 surface. Internal report CLS01_VALID_MSS.pdf, CLS Ramonville St Agne, France.
- Hernández-Pajares, M., J.M.Juan, J.Sanz & R.Orús, (2007) Second-order ionospheric term in GPS: Implementation and impact on geodetic estimates, *Journal Geophys. Res.*, Vol. 112, B08417, doi:10.1029/2006JB004707, 2007.

- Hinderer J., C. de Linage, J.-P. Boy, P. Gegout, F. Masson, Y. Rogister, M. Amalvict, J. Pfeffer, F. Littel, B. Luck, R. Bayer, C. Champollion, P. Collard, N. Le Moigne, M. Diament, S. Deroussi, O. de Viron, R. Biancale, J.-M. Lemoine S. Bonvalot, G. Gabalda, O. Bock, P. Genthon, M. Boucher, G. Favreau, L. Séguis, M. Descloret, & S. Galle (2009) The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment: description and first results, *J. of Geodynamics*, sous presse.
- Holgate, S. J. (2007) On the decadal rates of sea level change during the twentieth century, *Geophysical Research Letters*, 34, L01602
- Hoque M. M., & N. Jakowski, (2006) Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning, *J Geod* ,81:259–268 DOI 10.1007/s00190-006-0106-0.
- Jerret, D., & J. Nash, (2001) Potential uses of surface based GPS water vapour measurements for meteorological purposes, *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, A, 457-461.
- Johansson, J.M., et al., (2002) Continuous GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandia: 1. Geodetic results, *J. Geophys. Res.*, 107(B8), 2157, doi:10.1029/2001JB000400.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J.J. Hnilo , M. Fiorino, & G.L. Potter, (2002) NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1631-1643.
- Kao H., S.-J. Shan, H. Dragert, G. Rogers, J. F. Cassidy, K. Wang, T. S. James, & K. Ramachandran (2006), Spatial-temporal patterns of seismic tremors in northern Cascadia, *J. Geophys. Res.*, 111, B03309, doi:10.1029/2005JB003727.
- Kedar, S., G. A. Hajj, B. D. Wilson, & M. B. Heflin (2003), The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions, *Geophys. Res. Lett.*, 30(16), 1829, doi:10.1029/2003GL017639.
- King, R.W. & Bock, Y., (2006) Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software. Release 10.3, Mass. Institute of Technology and Scripps Institution of Oceanography.
- King M. A., C. S. Watson, N. T. Penna, & P. J. Clarke (2008), Subdaily signals in GPS observations and their effect at semiannual and annual periods, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03302, doi:10.1029/2007GL032252.
- Kuo, C., Shum, C., Braun, A. & Mitrovica, J.X. (2004) Vertical crustal motion determined by satellite altimetry and tide gauges data in Fennoscandia, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01608, doi:10.1029/2003GL019106.
- Lequentrec-Lalancette, M.F., B. Simon, M. Amalvict, J. Hinderer, (2002) Vertical movement and absolute gravity, Quadriennal Report of the CNFGG, IUGG XXIII General Assembly, 99-100.
- Llubes M., Florsch, N., Amalvict, M., Hinderer, J., Lalancette, M.-F., Orseau, D. & Simon, B., (2001) Observation gravimétriques des surcharges océaniques : premières expériences en Bretagne, *C.R. Académie Sciences, Series IIa*, 332, 77-82.
- Llubes, N. Florsch, J.P. Boy, M. Amalvict, P. Bonnefond, M-N. Bouin, S. Durand, M-F. Esnoult, P. Exertier, J. Hinderer, M-F. Lalancette, F. Masson, L. Morel, J. Nicolas & G. Wöppelmann, (2008) A multitechnique monitoring of ocean loading in North of France, *CR Géosciences*, doi:10.1016/j.crte.2008.03.05.
- Lyard F., Lefevre F., Letellier T., & Francis O. (2006) Modelling the global ocean tides: A modern insight from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56, 394-415, doi:10.1007/s10236-006-0086-x.
- Mader G., (1995-2005), site web GPS Antenna Calibration, <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>
- McCarthy, D. D. & G. Petit (eds), (2004) IERS Conventions (2003), IERS Technical Note, 32, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Melachroinos, S.A., Biancale R., Llubes M. , Perosanz F., Lyard F. , Vergnolle M. , Bouin M.-N. , Masson F. , Nicolas J. , L. Morel & S. Durand, (2007) Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids: comparisons to GPS estimates over the shelf of Brittany, France, *Journal of Geodesy*, doi :10.1007/s00190-007-0185-6.
- Morken D., R.S. Nerem & B. Haines, (2004) Using antenna phase calibration maps for improving the GPS vertical, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique*, Volume 23, 200.
- Munk, W., (2002) Twentieth century sea level: an enigma. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 99(10), pp. 6550-6555.
- Nerem, R. S., (1999) Measuring Very Low Frequency Sea Level Variations Using Satellite Altimeter Data,” *Global and Planetary Change*, Vol. 20, No. 2-3, pp. 157-171.

- Niell, A.E., (1996) Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. geophys. Res.*, 101, 3227-3246.
- Nocquet, J.M, Calais, E. & Parsons, B., (2005) Geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06308, doi:10.1029/2004GL022174.
- Nuret, M., Lafore, J.P., Bock, O., Guichard, F., Agusti-Panareda, A., N'Gamini, J.B., & Redelsperger, J.L., (2008) Correction of humidity bias for Vaisala RS80 sondes during AMMA 2006 Observing Period, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25(11), DOI: 10.1175/2008JTECHA1103.1.
- Obana K, Katao H, & Ando M (2000) Seafloor positioning system with GPS-acoustic link for crustal dynamics observation - a preliminary result from experiments in the sea- Earth Planets Space 52: 415-423
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., & Factor J.K. (2008) An Earth gravitational model to degree 2160: EGM 2008, presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18.
- Peltier, W. R., (2004) Global glacial isostasy and the surface of the Ice-Age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE, *Ann. Rev. Earth and Planetary Sci.*, 32, 111-49, doi: 10.1146/annurev.earth.32.082503.144359.
- Peltier, W.R., & Tushingham, A.M., (1989) Global sea level rise and the greenhouse effect: might they be connected? *Science*, 244, pp. 806-810.
- Penna, N.T., King, M.A. & Stewart, M.P., (2007) GPS height time series: Short period origins of spurious long period signals, *J. geophys. Res.*, 112, B02402, doi:10.1029/2005JB004047.
- Poli P., S. B. Healy, F. Rabier, & J. Pailleux (2008) Preliminary assessment of the scalability of GPS radio occultations impact in numerical weather prediction, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23811, doi:10.1029/2008GL035873.
- Ray J., G. Gendt, R. Ferland & Z. Altamimi, (2005) Short-term instabilities in IGS coordinate frames, *Proceedings of the EGU General Assembly*.
- Ray, J., (2008) IGSmail 5873, disponible sur <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmai/2008/maillist.html>.,
- Rülke, A., Dietrich, R., Fritzsche, M., Rothacher, M., & Steigenberger, P., (2008) Realization of the terrestrial reference system by a reprocessed global GPS network, *J. Geophys. Res.*, 113, B08403, doi:10.1029/2007JB005231.
- Savage, J. (1983), A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 88, 4984-4996.
- Simmons, A. J., & J. K. Gibson (2000), The ERA40 project plan, ERA40 Proj. Rep. Ser. 1, 62 pp., Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U. K.
- Simons, W., A. Socquet, C. Vigny, B. Ambrosius, S. Haji Abu, Chaiwat Promthong, C. Subarya, D.A. Sarsito, S. Matheussen, P. Morgan, & W. Spakman, (2007) A decade of GPS in SE Asia: Resolving Sundaland Motion and Boundaries, *J. Geophys. Res.*, 112, B06420, doi:10.1029/2005JB003868R.
- Singh, S.J., & Rani, S., (1993) Crustal deformation associated with two-dimensional thrust faulting, *J. Phys. Earth*, 41, 87-101.
- Spiess F.N., Chadwell D., Hildebrand D.A., Young L.E., Purcell G.H. Jr., & Dragert H. (1998) Precise GPS/acoustic positioning on seafloor reference points for tectonic studies, *Phys. Earth Planet. Int.*, 108, 101-112.
- Sultan, B., & S. Janicot, (2003) West African monsoon dynamics. Part II: The “pre-onset” and the “onset” of the summer monsoon. *J. Climate*, 16, 3407–3427.
- Szeliga W., T. Melbourne, M. Santillan, & M. Miller (2008), GPS constraints on 34 slow slip events within the Cascadia subduction zone, 1997–2005, *J. Geophys. Res.*, 113, B04404, doi:10.1029/2007JB004948.
- Tregoning P., Boers, R. & O'Brien, D., (1998) Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations, *J. geophys. Res.*, 103(D22), 28,701-28,710.
- Tregoning, P. & T. van Dam (2005) Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22310, doi:10.1029/2005GL024104.

- VanDam T. & P. Tregoning, (2005) Applying atmospheric pressure loading to geodetic analyses: daily corrections or at the observation level, Proceedings of the EGU General Assembly.
- Vergnolle, M., M.-N. Bouin, L. Morel, F. Masson, S. Durand, J. Nicolas & S. Melachroinos, (2008) GPS estimates of ocean tide loading in NW-France: Determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model, *Geophys. J.Int.*, doi: 10.1111/J;1365-246X.2008.03734.x.
- Vigny, C., Simons, W., Abu, S., Bamphenyu, R., Satirapod, C., Choosakul, N., Subarya, C., Socquet, A., Omar, K., Abidin H. & Ambrosius, B.A.C., (2005) Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia, *Nature*, 436, 201--206,doi:10.1038/nature03937.
- Walpersdorf, A., C. Vigny, C. Subarya & P. Manurung. (1998) Monitoring of the Palu-Koro fault by GPS, *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 13, pp. 2313-2316.
- Walpersdorf, A., O. Bock, E. Doerflinger, F. Masson, J. van Baelen, A. Somieski & B. Buerki, (2004) Data analysis of a dense GPS network operated during the ESCOMPTE campaign: First results. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 29, 2-3, pp 201-211.
- Walpersdorf, A., M-N Bouin, O. Bock & E. Doerflinger, (2007) Assessment of GPS data for meteorological applications over Africa: study of error sources and analysis of positioning accuracy, *J. Atm. Sol. Terr. Phys.* , doi:10.1016/j.jastp.2007.04.008.
- Wang, J., H. L. Cole, D. J. Carlson, E. R. Miller, K. Beierle, A. Paukkunen, & T. K. Laine, (2002) Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80 radiosonde - Application to TOGA_COARE data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 981-1002.
- Williams, S.D.P., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R.M., Prawirodirdjo, L., Miller, L. & Johnson, D.J., (2004) Error analysis of continuous GPS position time series, *J. Geophys. Res.*, 109, B03412, doi: 10.1029/2003JB002741.
- Wöppelmann, G., B. Martin Miguez, M-N. Bouin & Z. Altamimi, (2007) Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide, *Global and Planet. Change*, doi: 10.1016/j.glopacha.2007.02.002.
- Wöppelmann, G., C. Letetrel, A. Santamaria, M-N. Bouin, X. Collilieux, Z. Altamimi, S.D.P. Williams & B. Martin Miguez, (2009) Coastal sea level trends in the ITRF2005 reference frame from a complete reprocessed global GPS network of stations at tide gauges, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2009GL038720.
- Yan X., V. Ducrocq, P. Poli, M. Hakam, G. Jaubert, & A. Walpersdorf (2009), Impact of GPS zenith delay assimilation on convective-scale prediction of Mediterranean heavy rainfall, *J. Geophys. Res.*, 114, D03104, doi:10.1029/2008JD011036.
- Yuan, L., R. Anthes, R. Ware, C. Rocken, W. Bonner, M. Bevis, & S. Businger (1993), Sensing Climate Change Using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 98(D8), 14925-14937.
- Zhang, J., Y. Bock, H. Johnson, P. Fang, S. Williams, J. Genrich, S. Wdowinski, & J. Behr (1997), Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities, *J. Geophys. Res.*, 102(B8), 18035-18055.

Seconde partie : informations biographiques

Marie-Noëlle Bouin, née en 1969
Centre de Météo Marine
Météo France,
13 rue du Chatellier
29604 Brest Cedex

tel : 02 98 22 18 46
fax : 02 98 22 18 49
Marie-Noelle.Bouin@meteo.fr

Formation

1999 : Doctorat de l'Observatoire de Paris en Géodésie (1999, Prés. du jury F. Barlier, Directeur de thèse C. Boucher, co-directeur C. Vigny) préparé au Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure (Paris). *Traitemennt de données GPS en Antarctique : déformations crustales, rebond post-glaciaire et systèmes de référence.* Mention TB félicitations du jury

1995 : DEA d'Astronomie, Mécanique Céleste et Géodésie (Observatoire de Paris)

1994 : DEA de Sciences de l'Information Géographique (ENSG)

1995 : Diplôme d'Ingénieur Géographe de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques.

1993 : Diplôme d'ingénieur de l'Ecole Polytechnique.

Parcours professionnel

Depuis 2008 : Chargée de Recherches au Centre de Météo Marine, CNRM, Météo France, Brest.

1995 – 2007 : Chargée de recherches (Ingénieur géographe puis Ingénieur des Ponts et Chaussées) au Laboratoire de Recherches en Géodésie de l'IGN. Responsable de l'action de recherches « DYPHY », Mesures de déformations par GPS.

1995 – 1999 : Thèse au Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure, Paris

Distinctions : Chevalier de l'ordre des Palmes Académiques, 2009

Enseignement et encadrement d'étudiants :

Enseignement (de 10 à 15h par an, 1999-2009)

Depuis 2007 : responsable du module « Positionnement », cycle ingénieur hydro 2^e année de l'Ensieta, Brest ; cours GPS.

2003-2009 : Formation d'une quinzaine d'étudiants ou chercheurs au logiciel GPS Gamit.

2005 : Cours sur le GPS au Mastère M2 Positionnement de l'ENSG.

2005 : Cours sur le GPS à l'école thématique du CNRS, Vars.

2001-2006 : Cours Initiation à la géodynamique dans le cours Ingénieur des Travaux 2^e année de l'ENSG et Géomètre 1^{ere} année de l'ENSG.

De 1998 à 2000 : Cours Inversion par moindres carrés, Géomètre 1^{ère} année, ENSG.

2003 : Organisation complète d'une école d'été d'une semaine, 40 participants, Outils de la Géodésie pour la Géophysique, financement GDR-G2, Forcalquier.

Encadrement d'un doctorant, N. Bergeot, IPGP/LAREG, thèse soutenue en 2007, Etude du cycle sismique du Vanuatu par GPS.

Encadrement de 2 doctorants en cours :

Alvaro Santamaria (IGN Espagne, en thèse au LAREG depuis 2007) : Métrologie des mouvements absous et relatifs de l'écorce terrestre et du niveau marin en milieu littoral

Samuel Nahmani, (ITCGE, en thèse au LAREG depuis 2007, co encadrement avec O. Bock) : Etude et développement de méthodes de traitement GPS pour la mesure des retards troposphériques et des déformations verticales du sol.

Encadrement d'une dizaine de stagiaires (M2 ou TFE école d'Ingénieur) depuis 1999.

Animation scientifique :

Participation active au GDR « Géodésie Géophysique » de 2001 à 2007.
Revue d'articles pour le Journal of Geodesy et Journal of Geodynamics.

Projets et financements :

Bien que chercheur IGN, j'ai participé à de nombreux projets externes :

- Réponse à l'appel d'offres TOSCA 2008 (Analyses GPS en réseau global pour l'étude des mouvements verticaux de l'écorce terrestre – Participation au projet TIGA de l'IGS, 20 kEuros demandés), **responsable de projet**, partenariats : CLDG-ULR.
- Réponse à l'appel d'offres TOSCA OSTST 2007 (FOAM : From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring, 510 kEuros demandés et obtenus sur 2008-2011, responsable du projet P. Bonnefond, partenariats Gemini- LEGOS-IPGP-Noveltis)
- Réponse à l'appel d'offres TOSCA 2007 (Analyses GPS en réseau global pour l'étude des mouvements verticaux de l'écorce terrestre – Participation au projet TIGA de l'IGS, 12 kEuros demandés), **responsable de projet**, partenariats : CLDG-ULR.
- Réponse à l'appel d'offres ANR CATELL 2006 (Dynamique Eruptive et Cycle Sismique dans l'Arc du Vanuatu, 600 kEuros obtenus sur 1100 demandés), **responsable du volet géodésie**, coordination globale : B. Pelletier, partenariats IRD, IPGP, GéoAzur...
- Réponse à l'appel d'offre API / AMMA 2005, (Implémentation GPS dans le cadre du projet AMMA, 150 kEuros obtenus sur 220 demandés), **co-responsable de projet avec O. Bock**, partenariats : SA, LDL Montpellier, LGIT Grenoble, IRD.
- Réponse à l'appel d'offre API / AMMA 2006, (Implémentation GPS dans le cadre du projet AMMA, 85 kEuros obtenus sur 115 demandés), **co-responsable de projet avec O. Bock**, partenariats : SA, LDL Montpellier, LGIT Grenoble, IRD.
- Réponse à l'appel d'offres TOSCA 2005 (Analyses GPS en réseau global pour l'étude des mouvements verticaux de l'écorce terrestre – Participation au projet TIGA de l'IGS, 12 kEuros demandés), **responsable de projet**, partenariats : CLDG-ULR.
- Réponse à l'appel d'offres DyETI 2005 (Caractérisation de la déformation d'une zone de subduction rapide partiellement bloquée : Vanuatu central, 30 kEuros obtenus sur 40 demandés),

responsable de projet, partenariats : IPGP UMR 7096, LEGOS UMR 5566, GéoAzur UMR 6526, IRD Nouméa.

- Réponse à l'appel d'offres DyETI 2004 (Caractérisation de la déformation d'une zone de subduction rapide partiellement bloquée : Vanuatu central, 13 kEuros obtenus sur 40 demandés), **responsable de projet**, partenariats : IPGP UMR 7096, LEGOS UMR 5566, GéoAzur UMR 6526, IRD Nouméa.
- Réponse à l'appel d'offres GDR-G2 2004 (Installation d'une station GPS permanente à Crozet, 2,8 kEuros demandés et obtenus), **responsable de projet**, partenariats : LEGOS UMR 5566, CLDG-ULR.
- Réponse à l'appel d'offres GRGS 2004 (Analyses GPS en réseau global pour l'étude des mouvements verticaux de l'écorce terrestre – Participation au projet TIGA de l'IGS, 12 kEuros demandés et obtenus), **responsable de projet**, partenariats : CLDG-ULR.
- Projet RTE Geodesea (responsable : J. Amman, IPGP UMR 7096, Système de mesures précises de positionnement sous l'eau – 600 kEuros obtenus en 2002 puis gelés jusqu'en 2004, réactivés 2004), partenariats : IPGP UMR 7096, ACSA, EDF, GEOID, ORCA.
- Réponse à l'appel d'offres GDR-G2 2004 (responsable : M. Llubes, LEGOS UMR 5566, Campagne multitechnique d'étude de la charge océanique, entre la pointe Bretagne et le Cotentin – 30 kEuros demandés, 20 obtenus), partenariats : CLDG, ESGT, IPGP – UMR 7580, IPGS UMR 7516, LDL – UMR 5573, OCA, SHOM, UMR 7619- UPMC.
- Réponse à l'appel d'offres GDR-G2 2004 (responsable : J. Chéry, Mesure de la déformation des Alpes occidentales par GPS, 16 kEuros demandés et obtenus), partenariats : ING Rome, ETH Zurich, Purdue Univ., ENS Paris, OMP Toulouse, LGCA Chambéry, LGIT Grenoble, OCA, EOST Strasbourg, GéoAzur, IPGP, ESGT, IRSN.
- Réponse à l'appel d'offres DyETI 2004 (responsable : J. Chéry, Mesure de la déformation des Alpes occidentales par GPS, 14 kEuros demandés et obtenus), partenariats : ING Rome, ETH Zurich, Purdue Univ., ENS Paris, OMP Toulouse, LGCA Chambéry, LGIT Grenoble, OCA, EOST Strasbourg, GéoAzur, IPGP, ESGT, IRSN.
- Réponse à l'appel à propositions ACI Jeunes Chercheurs 2003 (responsable : G. Wöppelmann, Etude des mouvements respectifs de l'écorce terrestre et du niveau marin en milieu littoral par une approche globale, 330 kEuros demandés sur 3 ans, non accepté), partenariats : CLDG, SHOM, LEGOS.
- Réponse à l'appel à propositions ACI Jeunes Chercheurs 2004 (responsable : V. Ballu, Station géodésique offshore en Mer Ligure, 140 kEuros, non accepté), partenariats : IPGP, GéoAzur.
- Réponse à l'appel à propositions ACI Jeunes Chercheurs 2002 (responsable : V. Ballu, Station géodésique offshore en Mer Ligure, 181 kEuros, non accepté), partenariats : IPGP, GéoAzur, ENS Paris.

Campagnes de terrain

- **17 campagnes de mesures GPS** en Indonésie (2, 1996), Philippines (1999), Myanmar (2, 1998 et 2000), Polynésie Française (2000), France (2000, 2002 et 2004), Iran (2003), Vanuatu (2, 2004 et 2008) et Afrique de l'Ouest (5, 2004, 2005, 2006 et 2007).
- **7 campagnes en mer** : Nivmer03 et Nivmer04 (TAAF, 2003 et 2004), Graviluck (Açores, 2006), Mottevas/Vataterme (Vanuatu, 2004), Geodeva 1 à 3 (Vanuatu, 2006, 2007 et 2009).

Collaborations

Principalement : Valérie Ballu (IPGP/Géosciences Azur/IRD Port Vila) pour les projets Géodésie fond de mer et le cycle sismique au Vanuatu, Olivier Bock (SA/IPSL puis IGN/LAREG) pour l'étude de l'humidité atmosphérique et Guy Wöppelmann (LIENSS/U. La Rochelle) pour TIGA.

Et aussi : CNRM/Meteo France, DT/INSU, Géologie/ENS Paris, EOST Strasbourg, ESGT (Le Mans), Géosciences Azur, Géosciences Montpellier, IRD Cotonou, IRD Niamey, IRD Nouméa, LAREG/IGN, LEGOS Toulouse, LGG/IPGP, LGIT Grenoble, LMD Palaiseau, LOEMI/IGN, SA/IPSL, SHOM, Sysiphe Paris 6.

Production scientifique

Articles dans des revues avec comité de lecture (* fournis en annexe)

- [1] **M-N. Bouin** and C. Vigny, New constraints on Antarctic plate motion and deformation from GPS data, *J. Geophys. Res.*, 105 B 12, pp 28279-28294, 2000.
- [2] Vigny C., A. Socquet, C. Rangin, N. Chamot-Rooke, M. Pubellier, **M-N Bouin**, G. Bertrand, M. Becker, Present day crustal deformation around Sagaing fault, Myanmar, *J. Geophys. Res.*, 108 (B11), 2533, doi:10.1029/2002JB001999, 2003.
- [3] S. Calmant, K. Cheng, G. Jan, C. Kuo, C. Shum, Y. Yi, V. Ballu and **M.N. Bouin**, Comparison of sea surface heights derived from satellite altimetry and from ocean bottom pressure gauges : the SW Pacific MOTEVAS project ; *Marine Geodesy*, 27, 597-613, 2004.
- [4] C. Champollion, F. Masson, **M.-N. Bouin**, A. Walpersdorf, E. Doerflinger, O. Bock, J. Van Baelen, GPS Water Vapour Tomography: First results from the ESCOMPTE Field Experiment, *Atmospheric Res.*, Vol 74, Iss. 1-4, pp. 253-274, 2005.
- [5] O. Bock, C. Keil, E. Richard, C. Flamant and **M.N. Bouin**, Validations of precipitable water from ECMWF model analyses with GPS data during the MAP SOP, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, Vol. 131, Part B No. 612, 2005.
- [6] O. Bock, F. Guichard , S. Janicot , J.P. Lafore , **M.-N. Bouin** , B. Sultan, Multiscale analysis of precipitable water vapor over Africa from GPS data and ECMWF analyses, *Geophys. Res. Letters*, 34, L09705, doi:10.1029/2006GL028039, 2007.
- [7]* G. Wöppelmann, B. Martin Miguez, **M-N. Bouin**, Z. Altamimi, Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide, *Global and Planet. Change*, 57 (3-4), doi: 10.1016/j.glochaha.2007.02.002, 2007.
- [8]* O. Bock, **M-N Bouin**, A. Walpersdorf, J.P. Lafore, S. Janicot and F. Guichard, Assessment of GPS data for meteorological applications over Africa: analysis of precipitable water vapour, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, doi:10.1002/qj.185, 2007.
- [9]* A. Walpersdorf, **M-N Bouin**, O. Bock and E. Doerflinger, Assessment of GPS data for meteorological applications over Africa: study of error sources and analysis of positioning accuracy, *J. Atm. Sol. Terr. Phys.*, 69(12), doi:10.1016/j.jastp.2007.04.008, 2007.
- [10] S.A. Melachroinos, Biancale R., Llubes M. , Perosanz F., Lyard F. , Vergnolle M. , **Bouin M.-N.** , Masson F. , Nicolas J. , L. Morel and S. Durand, Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids: comparisons to GPS estimates over the shelf of Brittany, France, *Journal of Geodesy*, doi :10.1007/s00190-007-0185-6, 2007.
- [11] G. Wöppelmann, **M-N Bouin** and Z. Altamimi, Terrestrial reference frame implementation in global GPS analysis at TIGA ULR consortium, *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, Volume 33, Issues 3-4, doi 10.1016/j.pce.2006.11.001, 2008.
- [12]* M. Vergnolle, **M.-N. Bouin**, L. Morel, F. Masson, S. Durand, J. Nicolas, S. Melachroinos, GPS estimates of ocean tide loading in NW-France: Determination of ocean tide loading constituents and comparison with a recent ocean tide model, *Geophys. J.Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03734.x, 2008.

- [13] M. Llubes, N. Florsch, J.P. Boy, M. Amalvict, P. Bonnefond, **M-N. Bouin**, S. Durand, M-F. Esnoult, P. Exertier, J. Hinderer, M-F. Lalancette, F. Masson, L. Morel, J. Nicolas and G. Wöppelmann, A multitechnique monitoring of ocean loading in North of France, *CR Géosciences*, 340(6), doi:10.1016/j.crte.2008.03.05, 2008.
- [14]* O. Bock, **M.N. Bouin**, E. Doerflinger, P. Collard, F. Masson, R. Meynadier, S. Nahmani, M. Koité, K. Gaptia Lawan Balawan, F. Didé, D. Ouedraogo, G. Wilson, F. Guichard, S. Janicot, J.P. Lafore, M. Nuret, The West African Monsoon observed by ground-based GPS receivers during the AMMA project, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD010327, 2008.
- [15] V. Ballu, J. Ammann, O. Pot, O. de Viron, G. Sasagawa, G. Reverdin, **M.N. Bouin**, M. Cannat, C. Deplus, S. Deroussi, M. Maia and M. Diament, A seafloor experiment to monitor vertical deformation at the Lucky Strike volcano, Mid-Atlantic Ridge, *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-008-0248-3, 2009.
- [16] M. Amalvict, P. Willis, G. Wöppelmann, E. Ivins, **M.-N. Bouin**, L. Testut and J. Hinderer, Isostatic stability of the East Antarctic station Dumont d'Urville from long-term geodetic observations and geophysical models, *Polar Research*, 28(2), doi:10.1111/j.1751-8369.2008.00091.x, 2009.
- [17]* N. Bergeot, **M.N. Bouin**, M. Diament, B. Pelletier, M. Régnier, S. Calmant, and V. Ballu, Interseismic velocity field in the central Vanuatu locked subduction zone context from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2007JB005249, 2009.
- [18]* **M.N. Bouin**, V. Ballu, S. Calmant, B. Pelletier, Improving resolution and accuracy of Mean Sea Surface from kinematic GPS, Vanuatu Subduction Zone. *J. of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-009-0320-7, 2009.
- [19] G. Wöppelmann, C. Letetrel, A. Santamaria, **M-N. Bouin**, X. Collilieux, Z. Altamimi, S.D.P. Williams, B. Martin Miguez", Coastal sea level trends in the ITRF2005 reference frame from a complete reprocessed global GPS network of stations at tide gauges, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2009GL038720, 2009.
- [20]* **M.N. Bouin**, V. Ballu, S. Calmant, B. Pelletier, J.M. Boré, E. Folcher , J. Ammann, Methodology of kinematic GPS experiment for local sea surface mapping, Vanuatu, *J. of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-009-0338-x, 2009.
- [21] C. Champollion, Ph. Drobinski, M. Haeffelin, O. Bock, J. Tarniewicz, **M-N. Bouin** , R. Vautard, Water vapor variability induced by urban/rural surface heterogeneities during convective conditions, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 135 (642), doi : 10.1002/qj.446, 2009.
- [22]* V. Ballu, **MN Bouin**, S. Calmant, E. Folcher, JM. Bore, J. Ammann, O. Pot, M. Diament and B. Pelletier, Obtaining centimeter level submarine benchmark heights by combining tide gauge and kinematic GPS data, *J. of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-009-0345-y, sous presse.
- [23]* **M.N. Bouin**, G. Wöppelmann, Land motion estimates from GPS at tide gauges: a geophysical evaluation, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04411.x, sous presse.
- [24] J. Legrand , N. Bergeot, C. Bruyninx, G. Wöppelmann, **M.-N. Bouin**, Z. Altamimi, Impact of Regional Reference Frame Definition on Geodynamic Interpretations, *J. of Geodynamics*, doi: 10.1016/j.jog.2009.10.002, sous presse.

Communications à des congrès avec actes

- [25] O. Bock, C. Flamant, E. Richard, C. Keil, **M.N. Bouin**, Time series of satellite laser ranging station positions, in *Proceedings SF2A'03, Bordeaux, Juin 2003*, 2003.
- [26] G. Wöppelmann, S. McLellan, **M-N. Bouin**, Z. Altamimi, L. Daniel, Current GPS data analysis at CLDG for the IGS TIGA Pilot Project, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et Sismologie*, Volume 23, 2004.

Soumis

- [27] A. Santamaria, **M.N. Bouin** and G. Wöppelmann, Improved GPS data analysis strategy for tide gauge benchmark monitoring, soumis à IAG Proceedings.
- [28] J. Legrand, N. Bergeot, C. Bruyninx, G. Wöppelmann, A. Santamaria-Gomez, **M.-N. Bouin**, Z. Altamimi, Comparison of Regional and Global GNSS Positions, Velocities and Residual Time Series, soumis à IAG Proceedings.
- [29] J. Nicolas, S. Durand, M. Vergnolle, L. Morel, S. Melachroinos, **M.N. Bouin** and F. Fund, Ocean loading in Brittany, Northwest France: impact of the GPS analysis strategy, soumis à VII Hotine-Marussi Symposium proceedings.

Articles dans diverses revues technico-professionnelles

- [30] Etude de la flexion continentale sous la charge océanique à partir des données RGP, **MN Bouin**, *Bulletin d'Information de la Recherche à l'IGN*, 2002.
- [31] Validation du mouvement absolu de la plaque Pacifique, S. Calmant, N. Bergeot et **M-N Bouin**, *CPTN*, 2007.
- [32] Le GPS au service des sciences de l'atmosphère, *Sahel Science* n°15, décembre 2007.

Rapports

- [33] **MN Bouin** et A. Guillot, Rapport de mission océanographique NIVMER03, Institut Paul Emile Victor, 2003.
- [34] **MN Bouin** et O. Bock, VAPIC, campagne inter instrumentale pour la mesure de vapeur d'eau en région parisienne, Rapport de campagne GPS, 2004
- [35] **MN Bouin** et A. Guillot, Rapport de mission océanographique NIVMER04, Institut Paul Emile Victor, 2004.
- [36] **MN Bouin** et E. Doerflinger, AMMA GPS EOP Bénin Niger, Rapport de mission de reconnaissance, 2004.
- [37] **MN Bouin** et P. Collard, AMMA GPS EOP, Rapport de mission d'installation, 2005.
- [38] **MN Bouin** et O. Bock, AMMA GPS Mali, Rapport de mission de reconnaissance, 2005.
- [39] **M.N. Bouin**, AMMA GPS EOP, Rapport de mission de maintenance, 2007.

Communications en congrès et colloques depuis 2004 (83+22 de 1998 à 2003)

- [40] G. Woppelmann, Z. Altamimi and **M-N Bouin**, Reference frame implementation at ULR TIGA Analysis Centre, Workshop IGS (Berne), 2004.
- [41] **M-N Bouin**, V Ballu, S Calmant, K Cheng, C.K. Shum, L Testut, A Braun and G Jan, Local sea surface in the Vanuatu Archipelago from GPS, satellite altimetry and pressure gauge data, EGU General Assembly, 2004.
- [42] G Wöppelmann, **M-N Bouin**, Z Altamimi and Ch El Hajj, Influence of GPS Processing and Combination Strategies on Reference Frame Realization for Sea Level Monitoring, EGU General Assembly, 2004.
- [43] O. Bock, C. Flamant, E. Richard, C. Keil and **M.N. Bouin**, Validation of precipitable water from ECMWF model with GPS data during the MAP SOP, EGU General Assembly, 2004.
- [44] O. Bock, C. Flamant, E. Richard, C. Keil and **M.N. Bouin**, Validation of precipitable water from ECMWF model with GPS data during the MAP SOP, 11th conference on Mountain meteorology, 21-25 june, Bartlett, 2004.
- [45] G. Woppelmann, **M-N Bouin** and Z. Altamimi, Learning from TIGA global GPS analysis at ULR consortium, Colloque ESEAS, 2004.
- [46] **M-N Bouin**, V Ballu, S Calmant, K Cheng, C.K. Shum, et L Testut, Mesure de la surface moyenne océanique et déformations verticales du plancher marin aux Vanuatu, par techniques géodésiques et marégraphiques combinées, ARFP 2004.
- [47] N. Bergeot, **MN Bouin**, S. Calmant, M. Régnier, B. Pelletier, P. Lebellegard, M. Diamant, Caractérisation de la déformation de l'Archipel des Vanuatu par géodésie, ARFP 2004.
- [48] **M-N Bouin**, Retard troposphérique GPS et paramétrisation du traitement, Présentation au colloque G2 (actes sur CD), 2004.
- [49] G. Woppelmann, **M-N Bouin** et Z. Altamimi, Quelques enseignements des analyses globales conduites dans le cadre de l'IGS, Présentation au colloque G2 (actes sur CD), 2004.
- [50] M. Llubes et le groupe Surcharge océanique (dont **M-N Bouin**), Campagne multi-technique d'étude de la charge océanique, entre la pointe Bretagne et le Cotentin, Présentation au colloque G2 (actes sur CD), 2004.
- [51] K. Cheng, V. Ballu, **M.N. Bouin**, S. Calmant and C.K. Shum, Absolute local sea surface in the Vanuatu Archipelago from GPS, satellite altimetry and tide gauge data, proceedings of the AGU Fall Meeting 2004.
- [52] **M.N. Bouin**, M. Llubes, S. Durand, F. Masson, L. Morel et J. Nicolas, Campagne multi-technique d'étude de la charge océanique, entre la pointe Bretagne et le Cotentin : méthodologie GPS et premiers résultats, Journées Recherche de l'IGN, 2005.
- [53] **M.N. Bouin**, V. Ballu, S. Calmant, K. Cheng and C.K. Shum, Monitoring local sea surface by onboard GPS, tide gauge data and satellite altimetry, proceedings of the EGU General Assembly, 2005.

- [54] **M.N. Bouin**, S. Durand, M. Llubes, F. Masson, L. Morel and J. Nicolas, Reference frame realization and ocean loading effects : a GPS experiment, proceedings of the EGU General Assembly, 2005.
- [55] O. Bock, **M.N. Bouin**, A. Walpersdorf, E. Doerflinger and F. Masson, Analysis of precipitable water vapour from GPS data in West Africa : first results and perspectives for the AMMA project, proceedings of the EGU General Assembly, 2005.
- [56] A. Walpersdorf, **M.N. Bouin** and O. Bock, Study of the error sources in GPS data from the IGS network in Africa and potential for applications in the AMMA project, proceedings of the EGU General Assembly, 2005.
- [57] **M.N. Bouin**, Analyses scientifiques GPS : paramètres et modèles, présentation aux Journées Galileo du MRT, 2005 (invitée).
- [58] N. Bergeot, M. Diament, **M-N Bouin**, M. Régnier, Caractérisation de la déformation d'un arc dans un contexte de subduction partiellement bloquée - Exemple de l'archipel de Vanuatu, Congrès des doctorants Géosciences Azur, 2005.
- [59] **M.N. Bouin**, O. Bock, A. Walpersdorf, E. Doerflinger and F. Masson, Using GPS stations to retrieve precipitable water vapour in West Africa: First results and perspectives from the AMMA project, Dynamic Planet AIG General Assembly, 2005.
- [60] **M.N Bouin**, N. Florsch, M. Llubes, M. Vergnolle, S. Durand, F. Masson, L. Morel and J. Nicolas, First results of a multitechnique campaign for studying ocean loading effects in Brittany, France, Dynamic Planet AIG General Assembly, 2005 (invitée).
- [61] M. Vergnolle, L. Morel, S. Durand, J. Nicolas, **M-N Bouin**, F. Masson : Comparaison des stratégies de traitement GPS pour la campagne de surcharge 2004, Colloque GDR G2, 2005.
- [62] O. Bock, **M.N. Bouin**, F. Guichard, A. Walpersdorf, E. Doerflinger, F. Masson, Analysis of total water vapour content from GPS data, radiosondes and numerical weather prediction models in West Africa, AMMA First International Conference, 2005
- [63] M. Vergnolle, S. Durand, L. Morel, J. Nicolas, **M-N Bouin**, F. Masson, Study of ocean loading effects in Brittany, France, from a multi-software analysis of 6-month GPS data, AGU Fall General Meeting, 2005.
- [64] M. Vergnolle, **M.N. Bouin**, S. Melachroinos, L. Morel, S. Durand, J. Nicolas and F. Masson, GPS multi-software analysis applied to 3D ocean loading effects in NW France, 93e Journées Luxembourgeoises de Géodynamique, 2006 (invitée).
- [65] N. Bergeot, **M.N. Bouin**, M. Régnier, M. Diament, Arc partitioning due to ridge collision with an oceanic subduction trench: example of Vanuatu (South-western Pacific), 93e Journées Luxembourgeoises de Géodynamique, 2006.
- [66] V. Ballu, G. Jan, **MN Bouin**, S. Calmant, JM Bore, N. Bergeot and M. Diament, Vertical seafloor deformation in a partially locked subduction zone from tide gauge, altimetry and GPS data, Envisat Meeting “15 years of progress in radar altimetry”, 2006.
- [67] **M.N. Bouin**, GPS analysis parameterization and models and their effect on the positioning and troposphere results, proceedings of the EGU General Assembly, 2006 (invitée).

- [68] V. Ballu, O. de Viron, **M.N. Bouin**, G. Jan, M. Diament, S. Calmant, J.M. Bore and N. Bergeot, Determining vertical deformations in underwater areas, proceedings of the EGU General Assembly, 2006.
- [69] N. Bergeot, **M.N. Bouin**, M. Regnier, M. Diament, S. Calmant, B. Pelletier and P. Lebellegard, Interseismic and coseismic deformation in a locked subduction zone context, proceedings of the EGU General Assembly, 2006.
- [70] O. Bock, **M.N. Bouin**, E. Doerflinger, F. Masson, P. Collard, A. Walpersdorf, F. Guichard, Analysis of precipitable water vapour from GPS data in West Africa: first results from the AMMA project, proceedings of the EGU General Assembly, 2006.
- [71] P. Bosser, O. Bock, **M.N. Bouin**, J. Pelon and Ch. Thom, Comparison of wet tropospheric delay measurements from Raman lidar and GPS during the VAPIC campaign, proceedings of the EGU General Assembly, 2006.
- [72] C. Champollion, M. Haeffelin, P. Drobinski, O. Bock and **M.N. Bouin**, Investigation of water vapour variability induced by surface heterogeneities, proceedings of the EGU General Assembly, 2006.
- [73] G. Wöppelmann, B. Martín, **M-N. Bouin**, Z. Altamimi, An exercise of combining tide gauge and GPS results to derive trends in the sea level, colloque Understanding Sea-Level Rise and Variability, UNESCO, 2006 (invitée).
- [74] J. Nicolas, L. Morel, M. Vergnolle; S. Melachroinos, **M.N. Bouin**, S. Durand and F. Masson, GPS Analysis software effects on geodynamical application: Case study on ocean loading in Brittany, MW France, COSPAR Meeting, 2006.
- [75] **M-N Bouin**, V. Ballu, B. Pelletier, R. Bouillaguet, M. Diament, Mouvements tectoniques du fond océanique et variation du niveau marin au Vanuatu, poster présenté au colloque Points d'étape de la Recherche Française dans le Pacifique, 2006.
- [76] N. Bergeot, **M-N Bouin**, M. Diament, M. Régnier, B. Pelletier, Etude du cycle sismique dans une zone de subduction bloquée : exemple du Vanuatu central, poster présenté au colloque Points d'étape de la Recherche Française dans le Pacifique, 2006.
- [77] O. Bock, **M.N Bouin**, E. Doerflinger, P. Collard et F. Masson, AMMA GPS Network, 17-month status, AMMA SOP debriefing workshop, 2006.
- [78] B. Martin, G. Woppelmann et **M.N. Bouin**, Tendances du niveau marin issues de l'analyse à l'échelle globale des mesures GPS co-localisées avec des marégraphes, présentation au Colloque G2, 2006.
- [79] N. Bergeot, **M.N. Bouin**, M. Regnier, M. Diament, What is the effect of a subduction/collision indentor on the upper plate partitioning?, AGU Fall General Meeting, 2006.
- [80] M. Régnier, N. Bergeot, B. Delouis, **M.N. Bouin** and S. Calmant, Rupture Characteristics of Interplate and Back Arc Thrust Events in Central Vanuatu Subduction Zone: Implications for the Localization of the Plate Boundary, AGU Fall General Meeting, 2006.
- [81] V. Ballu, M. Cannat and GRAVILUCK Scientific Party (dont **M.N. Bouin**), MoMAR Observatory: a geophysical, geological and oceanoigraphical approach to the monitoring of the Lucky Strike Segment (GRAVILUCK Cruise), AGU Fall General Meeting, 2006.

- [82] J. Nicolas, L. Morel, M. Vergnolle, S. Melachroinos, **M.-N. Bouin**, S. Durand, and F. Masson, GPS analysis software effects on geodynamical application: Case study on ocean loading in Brittany, NW France, AGU Fall General Meeting, 2006
- [83] G. Wöppelmann, B. Martín Míguez, **M-N. Bouin**, Z. Altamimi, Elévation du niveau de la mer corrigée du GPS : le rôle de TIGA, AG section 1 CNFGG, 2007.
- [84] **M.N. Bouin**, O. Bock, E. Doerflinger, P. Collard et F. Masson, Utilisation du GPS permanent pour l'étude de la mousson africaine : premier bilan de AMMA, présentation AG section 1 CNFGG, 2007.
- [85] **M-N. Bouin**, G. Wöppelmann, B. Martín Míguez, Z. Altamimi, Le projet TIGA : comment le GPS permet de ré-estimer la montée du niveau de la mer, présentation aux Journées Recherche de l'IGN, 2007.
- [86] Melachroinos, S. A. and the GRGS loading team (dont **M.N. Bouin**), Ocean tide loading (OTL) displacements from global and local grids: comparison to GPS estimates, EGU General Assembly, 2007.
- [87] O. Bock, R. Meynadier, F. Guichard, P. Roucou, J.P. Lafore, S. Janicot, **M.N. Bouin**, E. Doerflinger, F. Masson, Precipitable water and water vapour transport over West Africa from GPS data and ECMWF analysis during the AMMA project, EGU General Assembly, 2007.
- [88] P. Bosser, O. Bock, **M.N. Bouin**, Tropospheric wet delay retrieval from Raman lidar measurements and GPS during the VAPIC Campaign, EGU General Assembly, 2007.
- [89] **M.N. Bouin**, S. Nahmani, O. Bock, E. Doerflinger, F. Masson, GPS measurements for precise tropospheric sounding: fitted processing strategy within the AMMA project, EGU General Assembly, 2007.
- [90] N. Bergeot, V. Ballu, **MN. Bouin**, M. Régnier, M. Diament, O de Viron, B. Pelletier, Vertical deformation in an ocean-ocean partially locked subduction zone, Conférence Subduction Montpellier, 2007.
- [91] M. Vergnolle, **M.N. Bouin**, J. Nicolas, L. Morel, F. Masson, S. Durand, S. Melachroinos, GPS estimates of ocean tide loading in NW-France and comparison with a recent ocean tide model, IUGG General Assembly, 2007.
- [92] **M.N. Bouin**, O. Bock, S. Nahmani, E. Doerflinger, F. Masson, Precipitable water vapour retrieval from GPS stations during the AMMA EOP/SOP: near real time and scientific analyses, Second International AMMA conference, 2007.
- [93] O. Bock, F. Guichard, R. Meynadier; J.P. Lafore S. Janicot and **M.N. Bouin**, Diurnal Cycle of precipitable water vapour observed by GPS over West Africa and its link with convection and precipitation, Second International AMMA conference, 2007.
- [94] O. Bock, **M.N. Bouin**, E. Doerflinger, F. Masson, P. Collard et al., The West African Monsoon observed with ground-based GPS receivers during AMMA EOP, Second International AMMA conference, 2007.
- [95] **M.N. Bouin**, GPS et humidité atmosphérique : de l'erreur à la mesure, Présentation (invitée) au colloque GDR-G2, 2007.

- [96] C. Letetrel, G. Woppelmann, **M.N. Bouin**, Z. Altamimi, M. Feissel-Vernier and A. Santamaría, ULR Re-analysed Global GPS Solution for Vertical Land Motion Correction at Tide Gauges, Eos Trans. AGU, 88(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G41A-08, 2007.
- [97] **Bouin, M.N.**; Ballu, V.; Calmant, S.; Pelletier, B.; Ammann, J.; Guillon, D.; Bouillaguet, R.; Panché, J.Y.; Folcher, E., Use of GPS high rate kinematic measurements for local sea surface determination, Vanuatu Archipelago, EGU General Assembly, 2008.
- [98] Bock, O.; Meynadier, R.; Guichard, F.; Lafore, J.P.; Janicot, S.; **Bouin, M.N.**; Nahmani, S.; Doerflinger, E.; Masson, F., Multiscale analysis of the West African Monsoon water cycle from GPS data and NWP models, EGU General Assembly, 2008.
- [99] Nahmani, S.; **Bouin, M.N.**; Bock, O.; Doerflinger, E.; Masson, F., GPS data processing modelling for water cycle studies over West Africa, EGU General Assembly, 2008.
- [100] Santamaría, A.; **Bouin, M-N.**; Wöppelmann, G., New strategy for reprocessing a global GPS network at the ULR TIGA analysis centre, EGU General Assembly, 2008.
- [101] G. Wöppelmann, C.Letetrel, **M-N. Bouin**, A. Santamaría, Z. Altamimi, and X. Collilieux, Vertical velocities at tide gauges from a global GPS reprocessing analysis: A synthesis of recent results, ESEAS Workshop, 2008.
- [102] G. Wöppelmann, **M-N. Bouin**, Z. Altamimi, C.Letetrel, A. Santamaría, and X. Collilieux, Vertical velocities at tide gauges from a completely reprocessed global GPS network of stations: How well do they work?, IGS Analysis Center Workshop, 2008.
- [103] **M.N. Bouin**, J. Rolland, J. Poitevin, G. Caniaux, A reference site for air-sea interactions monitoring in coastal domain, OCO conference, SeaTechWeek, 2008
- [104] A. Santamaría, **M.N. Bouin**, G. Woppelmann, C. Letetrel, Variations long terme du niveau de la mer dans un référentiel absolu : apport de 10 ans de GPS, Colloque CNFG2 « L'eau dans tous ses états », 2008.
- [105] J. Legrand, N. Bergeot, C. Bruyninx, G. Woppelmann, **M.N. Bouin** and Z. Altamimi, Influence of the Reference Frame Alignment on Station Positions and Velocities: Global or Regional?, AGU Fall Meeting, 2008.
- [106] S. Nahmani, **M.N. Bouin**, O. Bock, E. Doerflinger, F. Masson, GPS data processing for water cycle studies over West Africa : Comparisons of GPS and radiometer Wet Tropospheric Delay Estimates, AGU Fall Meeting, 2008.
- [107] D. Legain, A. Fiandrino, F. Lagarde, G. Pellecuer, P. Le Moigne, J. Barrié, E. Moulin, O. Traullé, G. Pigeon, **M.N. Bouin**, Mesures de flux de chaleur sensible par scintillométrie sur l'étang de Thau, Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, 27-29 Janvier 2009, Toulouse, 2009.
- [108] A. Santamaría, **M.N. Bouin** and G. Woppelmann, Impact of network configuration on global scale GPS processing, EGU General Assembly, 2009.
- [109] J. Legrand, N. Bergeot, C. Bruyninx, G. Woppelmann, **M.N. Bouin**, Z. Altamimi, Reliability of regional and global GNSS network solutions expressed in the global reference frame, EGU General Assembly, 2009.
- [110] O. Bock, **M.N. Bouin**, E. Doerflinger, S. Nahmani, GPS meteorology in Africa: Highlights from AMMA project, EGU General Assembly, 2009.

- [111] J. Hinderer and the GHYRAF team, The GHYRAF (Gravity and HYdrology in Africa) experiment: first results from GPS, GRACE and surface gravity observations in relation with water storage changes, EGU General Assembly, 2009.
- [112] A. Santamaria, **M.N. Bouin** and G. Wöppelmann, Global-scale vertical velocity field from continuous GPS stations collocated with tide gauges, IAG General Assembly, 2009.
- [113] F. Mantoura, L. Coppola, M. Cousin and the MOOSE team, MOOSE: an integrated multi-sites observatory system in the NW Mediterranean Sea, 3rd Workshop Hymex, 2009.
- [114] J. Legrand, N. Bergeot, C. Bruyninx, G. Wöppelmann, A. Santamaria, **M.N. Bouin** and Z. Altamimi, Comparison of regional and global GNSS position and velocity solutions, IAG General Assembly, 2009.
- [115] **M.N. Bouin**, V. Ballu, S. Calmant, J.M. Boré, E. Folcher, and J. Ammann, Towards seafloor geodesy using GPS and satellite altimetry in Wusi Bank, Santo Island, Vanuatu, STAR SOPAC meeting, 2009.
- [116] V. Ballu, **M.N. Bouin**, S. Calmant, B. Pelletier, N. Bergeot, A. Peltier, M. Kalsale, T. Kanas, J.C. Willy, P. Koroka, W. Crawford, E. Garaebiti, S. Todman, J. Cuevard, A. Worwor and M. Diament, A land and seafloor geodesy experiment in Vanuatu to study the seismic cycle in a partially locked subduction zone, STAR SOPAC meeting, 2009.
- [117] B. Pelletier and the ARC Vanuatu Team, State of works and preliminary results of the «Arc Vanuatu» program, STAR SOPAC meeting, 2009.
- [118] L. Coppola, F. Mantoura, S. Blain, **M.N. Bouin**, X. Durrieu de Madron, G. Gorsky, C. Goyet, S. Heussner, W. Ludwig, B. Queguiner, P. Raimbault, R. Sempere, C. Tamburini, J.C. Miquel, The MOOSE network: a tool to observe the long-term carbon change in the NW Mediterranean Sea, Ocean'Obs 09, 2009.
- [119] J. Turton, J. Rolland, P. Blouch, **M.N. Bouin**, S. North, H. Kleta, G. Westbrook, M.I. Ruiz, E-SURFMAR – The EUMETNET Surface Marine Observation Programme, Ocean'Obs 09, 2009.
- [120] S. Nahmani, O. Bock, **M.N. Bouin**, A. Santamaria, G. Wöppelmann, J.P. Boy, Etudes des processus hydro-météorologiques en Afrique de l'Ouest par GPS, Colloque G2, 2009.
- [121] V. Ballu, **M.N. Bouin**, P. Bonnefond, S. Calmant, A. Peltier, W. Crawford, B. Pelletier, N. Bergeot, M. Diament, Using seafloor pressure gauges and satellite altimetry data to constrain deformation models in a partially locked subduction zone, Central Vanuatu, AGU Fall Meeting, 2009.
- [122] S. Nahmani, O. Bock, **M.-N. Bouin**, A. Santamaria, G. Wöppelmann, and J.-P. Boy, Study of hydrometeorological processes over West Africa using permanent GPS stations, AGU Fall Meeting, 2009.