



HAL
open science

GEODESEA : Une expérience de positionnement géodésique fond de mer

Pierre Sakic, Jean-Yves Royer, Valérie Ballu, Helen Piété, Étienne Poirier,
Mickael Beauverger

► **To cite this version:**

Pierre Sakic, Jean-Yves Royer, Valérie Ballu, Helen Piété, Étienne Poirier, et al.. GEODESEA : Une expérience de positionnement géodésique fond de mer. *Revue XYZ*, 2019, 159, pp.37-43. hal-03046896

HAL Id: hal-03046896

<https://hal.univ-brest.fr/hal-03046896>

Submitted on 8 Dec 2020

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.

GEODESEA : Une expérience de positionnement géodésique fond de mer

Pierre Sakic^{1,2,*}, Jean-Yves Royer¹, Valérie Ballu²,
Helen Piété¹, Étienne Poirier², Mickael Beauverger¹

1 : Laboratoire Géosciences Océan, Université de Brest et CNRS, Plouzané, France,

2 : Laboratoire Littoral Environnement et Sociétés, Université de La Rochelle et CNRS, La Rochelle, France

* : Désormais au GFZ, Centre allemand de Recherche en Géosciences, Section 1.1 – Géodésie Spatiale, Helmholtz-Zentrum Potsdam, Potsdam, Allemagne

Résumé

Étendre les réseaux géodésiques en mer devient une nécessité afin de surveiller des structures tectoniques sous-marines actives comme les zones de subduction, susceptibles de générer des séismes dévastateurs (Sumatra en 2004, Tohoku en 2011 par ex.). À cette fin, l'approche GNSS/Acoustique permet, comme le GNSS à terre, de déterminer avec une précision centimétrique la position de points matérialisés par des balises acoustiques déployées de manière pérenne sur le plancher océanique.

Les résultats de la première expérience GNSS/A française réalisée en juin 2015 en mer Méditerranée (mission GEODESEA) sont présentés. Cette expérience s'est avérée très probante tant dans le protocole d'acquisition et les types d'équipement mis en œuvre, que dans la méthode de traitement mise au point.

Abstract

Extending geodetic networks at sea is becoming a necessity in order to monitor active underwater tectonic structures such as subduction zones, which can generate devastating earthquakes (Sumatra in 2004, Tohoku in 2011, for example). To this end, the GNSS/Acoustic approach makes it possible, like GNSS on land, to determine with centimetric accuracy the position of points materialized by acoustic beacons deployed permanently at the level of the ocean floor.

The results of the first French GNSS/A experiment carried out in June 2015 in the Mediterranean Sea (GEODESEA mission) are presented. This experience proved to be very convincing both in the acquisition protocol and the equipment used, as well as in the processing method developed.

1. Introduction

Les systèmes spatiaux de navigation (GNSS) sont devenus depuis une vingtaine d'années un outil indispensable pour l'observation et l'étude des processus géodynamiques à grande échelle. Cependant, en environnement sous-marin, cette approche est inopérante, car les ondes électromagnétiques ne se propagent pas dans l'eau. Pourtant, plus de 70 % de la surface terrestre sont recouverts par les océans, qui sont le siège de nombreux phénomènes tectoniques parmi les plus dévastateurs. C'est notamment le cas des zones de subduction à l'origine des plus grands séismes et tsunamis (ex. Sumatra en 2004, Tohoku en 2011). La limitation des observations GNSS aux seules terres émergées empêche le suivi de l'accumulation des contraintes et l'évaluation de

l'aléa sismique associé à ces frontières de plaques sous-marines. Il en est de même pour les segments de failles actives sous-marines dont certaines, comme la faille Nord-Anatolienne en mer de Marmara, sont situées à proximité de zones côtières très habitées.

Pour pallier ces difficultés, une approche consiste à combiner la géodésie spatiale au positionnement acoustique dans la colonne d'eau. L'approche GNSS/Acoustique ou GNSS/A (parfois appelée GPS/A) permet de positionner une balise ou un ensemble de balises posées sur le fond de mer par l'intermédiaire d'une plateforme de surface (typiquement un navire), elle-même repérée dans un référentiel terrestre tel que l'ITRF par géodésie spatiale. En laissant les balises acoustiques sur le fond plusieurs années de suite, on pourra caractériser leur déplacement par des mesures régulières de leur position, comme on le fait pour des monuments géodésiques à terre.

2. Principes du positionnement GNSS/A

L'objectif d'une expérience GNSS/A est de positionner dans un référentiel global et absolu un réseau de balises posées sur le fond de l'océan. La finalité est d'obtenir la/les vitesse(s) de déplacement d'un ou plusieurs points en mer dues à des causes tectoniques (de l'ordre du centimètre/an). Ces vitesses peuvent alors être directement comparées aux mesures de stations GNSS « classiques » réalisées à terre. Ceci permet de déduire un gradient de déformation, et donc un taux de couplage, information aidant entre autres à l'évaluation du risque sismique.

Ce positionnement est réalisé à l'aide d'une « tête acoustique » intermédiaire qui communique avec les balises dans le milieu marin et qui est positionnée simultanément en surface par les satellites GNSS. Le protocole de positionnement GNSS/A peut ainsi se scinder en deux segments (Figure 1) :

- Un segment surface : il s'agit de positionner la tête acoustique (ou transducteur) embarquée sur un navire ou un drone marin de surface dans un référentiel absolu, au moyen de récepteurs GNSS embarqués à bord de la plate-forme et d'un traitement cinématique. Des observations complémentaires d'attitude (roulis, tangage) sont également acquises au moyen d'une centrale d'attitude couplée à la tête acoustique, et ce afin de corriger les bras de levier entre les différents instruments. Toutes les mesures sont ainsi ramenées au centre d'émission/réception de la tête acoustique.
- Un segment sous-marin : il s'agit de déterminer la position relative des balises (ou transpondeurs) déployées de manière pérenne sur le plancher océanique par rapport à la tête acoustique. Cette position est déduite de mesures de temps de propagation aller-retour de signaux acoustiques émis par la tête acoustique et retransmis par les balises. Leur conversion en distances nécessite de connaître la vitesse du son dans la colonne d'eau.

La combinaison de ces observations permet de transférer la position GNSS absolue de la tête acoustique aux balises acoustiques sur le fond (ou à leur barycentre). Les acquisitions se déroulent en deux phases, comme détaillé dans la section 2. La première consiste à obtenir une position préliminaire de chaque balise qui sera utilisée comme a priori dans le traitement, et la seconde consiste à interroger le réseau simultanément en se positionnant à la verticale de son barycentre.

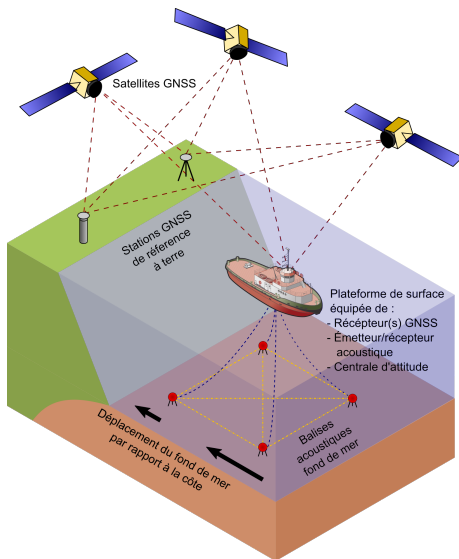


Figure 1 : Principe d'un positionnement GNSS/Acoustique. Il s'agit de combiner le positionnement par acoustique de balises fond de mer fixes par rapport à une plateforme de surface avec le positionnement GNSS absolu de cette dernière. La finalité est d'obtenir la position des balises dans un référentiel global, et plus encore celle du barycentre immatériel du polygone que dessinent les balises. Le point de référence en surface choisi est la tête acoustique communicant avec les balises fond de mer. Le positionnement cinématique de la plateforme est complété par des mesures d'attitude (tangage, roulis, cap).

Comme pour toute propagation d'ondes dans un milieu naturel, la conversion de temps de parcours en distance implique de bien caractériser la vitesse de propagation et donc les propriétés physiques du milieu. La célérité du son dans l'eau est fonction de la température, de la salinité et de la pression (profondeur) et peut être affectée par des phénomènes transitoires comme les courants, les ondes internes ou simplement la météo.

Positionner un objet ou engin sous-marin en combinant acoustique sous-marine et positionnement aérien par GNSS est une application courante dans le domaine industriel et pétrolier. Cependant, pour obtenir une précision centimétrique nécessaire pour caractériser des mouvements de l'ordre de quelques mm/an ou cm/an, il est nécessaire de s'affranchir de l'incertitude sur la vitesse de propagation du signal acoustique. La stratégie proposée par Spiess et al. (1998) est de ne pas travailler sur les trois composantes, mais de ne déterminer précisément que la composante horizontale (planimétrique) d'un polygone de balises, en se situant à l'aplomb du barycentre du polygone et en utilisant le fait qu'en première approximation, l'océan est stratifié horizontalement. Ainsi, si l'on est parfaitement au centre du dispositif, les rais acoustiques vers chacune des balises du polygone traversent les strates horizontales avec les mêmes angles d'incidence et passent donc le même temps dans chaque couche. Dans un modèle parfaitement stratifié et homogène latéralement, l'erreur commune sur chaque rai liée à la méconnaissance du profil de célérité est parfaitement compensée sur la composante planimétrique du barycentre des balises et ne se traduit que par une translation verticale du réseau.

3. La mission GEODESEA

La mission GEODESEA est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire Géosciences Océan (Brest), le laboratoire Littoral Environnement et Sociétés (La Rochelle), et la société Sonardyne Ltd (Royaume-Uni). Elle s'est déroulée du 17 au 22 juin 2015 à bord du N/O *Téthys II*, au large de Nice (Figure 2). L'objectif était de tester/valider un positionnement géodésique par GNSS/A par grande profondeur afin de valider un protocole expérimental, notamment tester le matériel proposé par la société Sonardyne, valider les méthodes de traitement et quantifier les différentes sources d'erreur dans un cas réel.

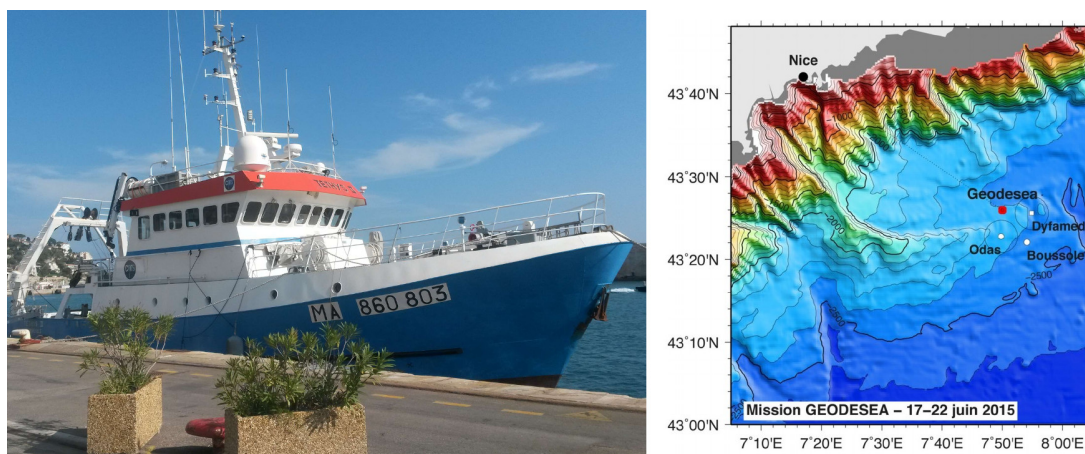


Figure 2 : Navire océanographique du CNRS/INSU Téthys II et site de déploiement de la mission GEODESEA, à proximité de mouillages permanents DYFAMED, Boussole (Obs. de Villefranche-sur-Mer) et ODAS (Météo France)

Le dispositif d'acquisition GNSS/A était composé (Figure 3) :

- de quatre balises Compatt Sonardyne interrogées de manière répétée par une tête acoustique intégrée à une centrale d'attitude (GyroUSBL Sonardyne), immergée au bout d'une perche d'environ 7 m de long sur le flanc du navire ;
- de quatre antennes GNSS disposées à la proue du navire, au sommet de la perche, à bâbord et tribord, en acquisition continue. Le GNSS au sommet de la perche était intégré au système de positionnement Sonardyne en mode RTK ;
- et d'un dispositif de mesure des paramètres environnementaux nécessaires pour caractériser la célérité du son dans l'eau (CTD ou salinité, température, pression) ; 5 profils CTD ont été acquis au cours de la campagne. Ces profils peuvent être réalisés plus directement à l'aide d'une sonde SVP (pour Sound Velocity Profile), toutefois non disponible à bord lors de la campagne.



Figure 3 : Équipements utilisés lors de la campagne GEODESEA, avant déploiement : balises acoustiques fond de mer insérées dans leur bouée et montées sur des trépieds lestés et tête acoustique associée à une centrale d'attitude (à droite).

Trois balises acoustiques ont été installées par 2400 m de profondeur au sommet d'un triangle équilatéral inscrit dans un cercle d'environ 1500 m de diamètre (~2600 m inter-balises), avec une quatrième balise au centre du dispositif. Les balises ont été déployées sur des trépieds lestés par des sacs de sable pour permettre une remontée à la surface par largage acoustique. Ce montage léger, choisi en raison de la nature temporaire de l'expérience, ne serait cependant pas adapté pour un déploiement long terme. Un premier positionnement de chacune des balises est obtenu par une méthode classique dite de "boxin" : le navire effectue un cercle de 800 m de rayon autour de la balise à positionner tout en l'interrogeant. Les coordonnées ainsi estimées, fondées sur un

positionnement GNSS en temps-réel RTK serviront comme information a priori dans l'inversion (section 7). À cette étape, les écart-types des distances déterminées entre le navire et chacune des balises sont métriques. Ces opérations de calibration permettent également de déterminer différents biais instrumentaux (notamment bras de levier du montage du gyroUSBL). À l'issue de ces opérations de calibration, 37h20 d'acquisition conjointe de données acoustiques et GNSS ont été réalisées, répartie en 4 sessions de 3 h à 15 h.

L'acquisition a débuté en maintenant le navire au centre du dispositif. En raison du bruit de l'hélice, la communication acoustique s'est avérée de trop mauvaise qualité pour espérer des résultats probants. Une solution alternative a alors consisté à réaliser les interrogations en laissant le navire dériver à travers le réseau, moteur débrayé, tout en tentant de passer au plus près de la balise centrale, en tirant au mieux parti des courants et du vent, à la manière décrite par Fujita et al. (2006). En fin de profil, les moteurs étaient remis en route pour repositionner le navire en début de profil de dérive. Les profils de dérive, de direction O-E à NO-SE, étaient de l'ordre de 200 à 500 m de long, avec une vitesse variable au cours du temps (< 1 nœud).

4. Positionnement de surface et rattachements topométriques des instruments à bord

Le positionnement de surface s'est basé sur quatre récepteurs GNSS avec antennes de type Leica, Topcon et Ashtech réparties sur le navire et rattachées par topométrie en début et fin de mission. Cependant, pour des questions de simplicité, seul le GNSS en sommet de perche a été exploité dans le traitement des données ci-après. Le positionnement en temps réel est assuré en RTK à partir de la station permanente de la ville de Nice (NICA). En post-traitement, nous avons utilisé une approche PPP avec NRCAN (Kouba and Héroux 2001). Compte tenu du fait que les coordonnées RTK sont exprimées dans le système national RGF93, et les coordonnées PPP dans l'ITRF à l'époque des mesures (ITRF2008@2015.46), la solution RTK a été ramenée dans l'ITRF à partir des paramètres de transformation de Boucher et Altamimi (2011). Malgré cette correction, d'importantes différences résiduelles de l'ordre de la dizaine de centimètres ont été observées entre positions PPP et RTK ramenées dans l'ITRF, en raison de la distance à l'unique station de base (~40 km).

Pour définir les vecteurs de rattachement entre les instruments embarqués, il est nécessaire au préalable de définir un repère orthonormé solidaire du navire. Cette opération s'effectue à l'aide de techniques de topométrie classique.

Réaliser de la topométrie à bord d'un navire est plus complexe qu'un levé standard à terre. Premièrement, si l'on souhaite pouvoir exploiter les instruments déployés à demeure sur le bateau (centrale d'attitude, GPS de navigation), il faut se rattacher sur un référentiel interne et donc réaliser les mesures à partir des points matérialisant ce repère. L'alternative, si ce n'est pas possible, est de définir un nouveau référentiel. Ceci exige alors de déployer de manière temporaire un ensemble de points d'appui permettant de matérialiser ou de densifier le référentiel interne.

Deuxièmement, il faut composer avec le fait que le navire est non seulement mobile, mais également soumis au roulis et tangage, ainsi que, dans une moindre mesure, à une déformation structurale interne. Ce constat simple a des implications notables pour les observations topométriques : le tachéomètre est particulièrement sensible aux mouvements, ce qui a pour effet de brouter les mesures. D'autre part, l'axe vertical du tachéomètre est à terre perpendiculaire à une équipotentielle du champ de pesanteur. À bord, on souhaite que ce même axe vertical du tachéomètre soit cette fois-ci parallèle à l'axe des Z du navire, qui n'est pas forcément parallèle à la verticale locale. Dans la mesure où il n'existe pas de moyen simple d'accéder à cet axe Z, une approximation doit être faite sur la verticalité du tachéomètre, en réalisant un bullage grossier lorsque le navire est à quai et relativement stable.

Une stratégie spécifique a donc été mise au point : à chaque session de mesure, on réalise au tachéomètre sur chaque point de station un double tour d'horizon par double retournement. Cependant, on enregistre non pas une, mais dix mesures, avec réajustement de la visée après cinq, ceci pour compenser la gîte qui perturbe la stabilité de l'instrument. Ces 5+5 mesures seront ensuite moyennées lors du traitement. Deux sessions de mesures ont été réalisées au début et à la fin de la mission, avant l'appareillage et au retour au port, lorsque le navire est stable. Ceci permet également d'interchanger facilement les antennes avec des prismes de visée, le positionnement GNSS n'étant alors pas nécessaire.

Compte tenu de la relative petite taille du navire (24.90 m), une seule station de visée, choisie judicieusement, a été nécessaire pour viser tous les points. Le N/O *Téthys II* ne disposant pas de référentiel interne préalablement observé, nous avons défini un référentiel *ad hoc* pour repérer tous les emplacements des antennes GNSS. Les points matérialisés et mesurés sont représentés sur la figure 4.

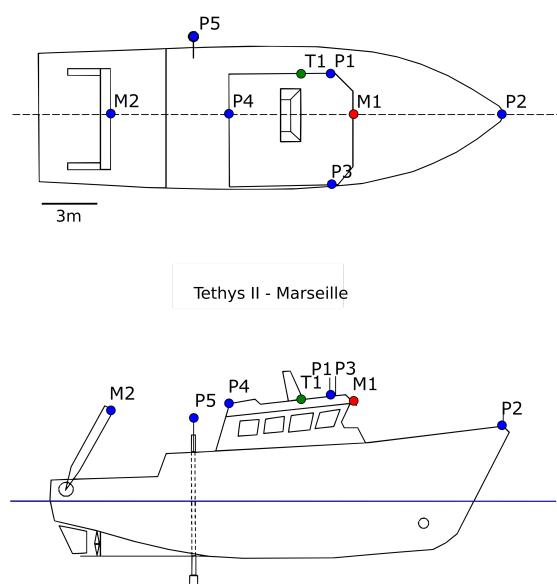


Figure 4 : Emplacement des points de topométrie sur le N/O *Téthys II*. Le point commun de visée est situé en T1, les points P marquent la position des prismes de visée lors des sessions de topométrie, et des antennes GNSS lors de la phase d'acquisition (à l'exception de P4), les points M sont des repères autocollants.

Les points M_x désignent des marqueurs autocollants, les P_x des supports à prisme ou antenne GNSS, et le point T1 représente la station du tachéomètre. Le marqueur M1 constitue l'origine, la ligne de foi (axe X) est définie comme étant la droite passant par M1 et P2, et l'axe Y est matérialisé par les points P1 et P3. En phase opérationnelle d'observation acoustique, les points P1, P2, P3 et P5 ont été équipés d'une antenne GNSS (P4 n'a pas été utilisé). L'antenne en P5 est une antenne « maître » dans le prolongement de la tête acoustique, afin de positionner cette dernière avec un bras de levier moindre. Les antennes en P1, P2, P3 ont pour vocation de se substituer à la centrale d'attitude pour des tests supplémentaires, mais également de remplacer l'antenne « maître » P5 en cas de défaillance.

Une répétabilité millimétrique est obtenue pour la plupart des points entre les deux sessions de mesure. Cependant, certains points présentent des différences de plusieurs millimètres entre les deux sessions. Ceci peut s'expliquer par une déformation interne du navire, ainsi que la présence de points sur des batayoles mobiles qui ont dû être déplacés en cours de mission. Cette expérience de topométrie à bord, bien que partiellement concluante, milite en faveur d'une miniaturisation de la plateforme d'acquisition (voir section 9).

5. Traitement et résultats

La procédure de traitement des données GNSS/A, résumée sur le schéma de la figure 5, comprend le positionnement de la tête acoustique dans un repère global externe et une inversion des temps de parcours acoustiques. Les données acquises en continu sont :

- Les positions de l'antenne GNSS principale, dans un référentiel terrestre, typiquement WGS84 ou ITRF (ITRF2008@2015.46 dans notre cas) aux instants d'échantillonnage t_{GNSS} .
- Les angles de roulis, de tangage et de cap, aux instants d'échantillonnage t_{INS} .
- Les temps d'aller-retour (*two-way-travel times*) τ entre la tête acoustique et chacune des balises fond de mer, réceptionnés à l'instant $t_{ASM, rec, i}$. L'instant d'émission $t_{ASM, emi, i}$ du ping correspondant est déterminé par la relation $t_{ASM, rec, i} = t_{ASM, emi, i} + \tau + TAT$, le TAT étant le *Turn Around Time*, un délai de réponse de la balise précisément calibré.
- Les vecteurs de rattachement des différents instruments dans le référentiel interne du navire (voir section 5). On considère le point de référence de la centrale d'attitude comme l'origine de ce repère. Les coordonnées du centre de phase de l'antenne GNSS et du centre de phase de la tête acoustique sont donc exprimées en fonction de la centrale d'attitude.

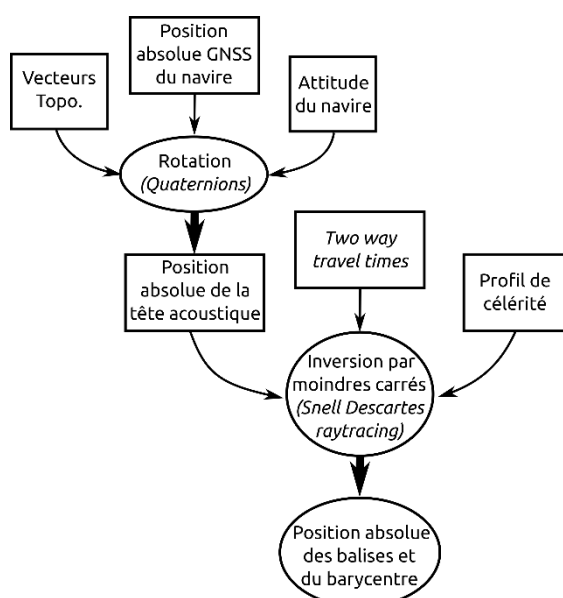


Figure 5 : Schéma synoptique du traitement des données. Les « positions absolues » correspondent à des positions dans un référentiel global externe.

L'objectif est tout d'abord d'obtenir la position de la tête acoustique aux instants $t_{ASM, rec, i}$ et $t_{ASM, emi, i}$. On considère de manière générale le problème dans un référentiel topocentrique dont l'origine est définie arbitrairement comme le centre de gravité de la trajectoire du navire. Les coordonnées ITRF GNSS sont alors transférées dans ce repère. Les positions GNSS aux instants $t_{ASM, rec, i}$ et $t_{ASM, emi, i}$ sont obtenues par interpolation linéaire, le pas d'échantillonnage étant important (1 Hz) et les mouvements relativement faibles. Ces positions sont ensuite transférées à la tête acoustique au moyen des vecteurs de rattachement et des angles d'attitude, préalablement convertis en quaternions et interpolés au moyen de l'approche *Slerp* (e.g. Dam et al. 1998).

Une fois la position de la tête acoustique déterminée, le calcul des positions des balises est réalisé au moyen d'une inversion par moindres carrés. La fonction d'observation utilisée est une fonction dite de tracé de rai ou *raytracing* (Sakic et al. 2018) qui associe à la position instantanée de la tête acoustique en surface dans un repère topocentrique X_S , un profil vertical de célérité C et la position des balises X_{Ri} , un temps de propagation aller-retour τ tel que :

$$f_{ASM}(X_S, X_{Ri}, C) \mapsto T$$

Durant le laps de temps entre l'émission et la réception du ping acoustique, la plate-forme en surface bouge. En première approximation, ce déplacement de l'ordre du mètre peut être négligé

devant la taille du chantier de l'ordre de plusieurs kilomètres, cependant cette hypothèse peut entraîner une erreur conséquente sur la restitution des positions des transpondeurs. Pour pallier ce problème, il faut affiner la fonction d'observation f_{ASM} . En supposant connues les positions de la plate-forme $X_{S,emi}$ et $X_{S,rec}$ à l'émission et à la réception du ping, la nouvelle fonction d'observation $f_{ASM, F/B}$ est alors :

$$T_{F/B} = T_{emi} + T_{rec} = f_{ASM}(X_{S,emi}, X_{ri}, C) + f_{ASM}(X_{S,rec}, X_{ri}, C) = f_{ASM, F/B}(X_{S,emi}, X_{S,rec}, X_{ri}, C)$$

Dans la mesure où nous cherchons principalement la position du barycentre du réseau de balises (voir section 2), nous estimons également la position de ce point. Cependant, comme il s'agit d'un point virtuel, il est estimé en ajoutant une contrainte de nullité des différences entre les coordonnées individuelles des balises et celles du barycentre. Le détail de la méthode est décrit dans Sakic et al. (2020). Les écarts-types à l'issue de l'inversion sont de l'ordre du centimètre ; un test de *bootstrapping* (méthode d'inférence statistique par rééchantillonnage des données) par 250 tirages aléatoires sur 50 % des observations puis restitution de la position du barycentre donne un écart-type de l'ordre de 2 cm sur chacune des composantes horizontales (Tableau 1).

Point	Balise 5203	Balise 5305	Balise 5307	Barycentre	Barycentre, <i>bootstrapping</i>
σ_N (m)	0.012	0.012	0.027	0.009	0.019
σ_E (m)	0.011	0.010	0.010	0.010	0.022
σ_D (m)	0.007	0.007	0.007	0.007	0.009

Tableau 1 : Écart-types sur les positions obtenues à l'issue de l'inversion et du test de *bootstrapping* sur les composantes horizontales (nord et est) et la distance oblique (D).

Si ces résultats sont satisfaisants et montrent a priori que la méthode d'inversion fonctionne, ils sont toutefois vraisemblablement optimistes au regard des résidus et de leur variation temporelle. Les résidus observés (Figure 6) présentent des variations à courtes périodes (~15min) liées aux mouvements du navire qui n'est pas toujours exactement à l'aplomb du centre du dispositif. Cela montre l'influence des hétérogénéités latérales de la tranche d'eau : les rais vers chacune des balises ne sont pas affectés exactement de la même façon par la tranche perturbée de surface, car l'angle d'émission vers chaque balise n'est pas exactement le même. On observe également des variations à plus longue période (plusieurs heures). Le fait que les résidus puissent atteindre plusieurs décimètres sur les distances obliques vers chacune des balises n'est pas un problème en soi si ces résidus sont du même ordre pour chaque balise et sont donc compensés lors du calcul du barycentre. De tels résidus ont déjà été observés lors d'expériences similaires (Osada et al. 2003 ; Spiess et al. 1998). Même si leurs causes et leur amplitude ne sont pas totalement expliquées, ils sont attribués à l'effet des marées ou d'ondes internes sur la célérité du son et sont éliminés en moyennant sur un temps d'acquisition suffisamment long.

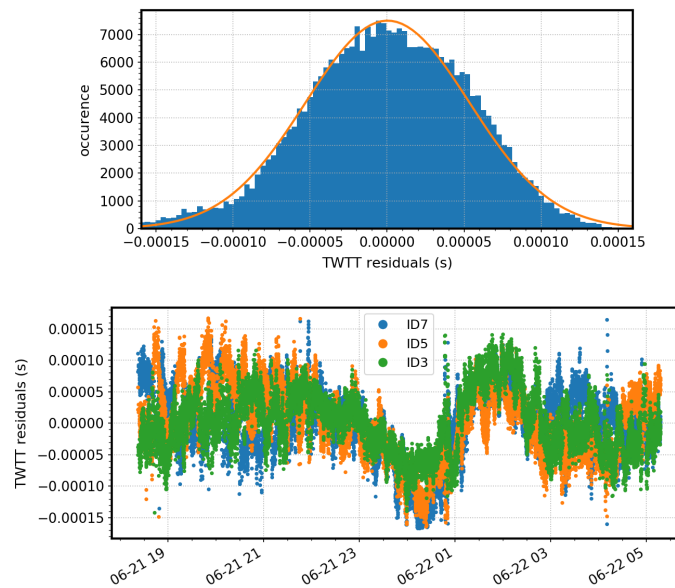


Figure 6 : Résidus des temps de parcours acoustiques (Two Way Travel times) par rapport au modèle : histogramme et représentation temporelle pour chacune des balises (ID 3, 5 et 7). Une erreur sur le temps de parcours (aller-retour) de 0.05 ms équivaut à une erreur sur la distance oblique de l'ordre de 4 cm.

6. Perspectives

Cette première expérience de positionnement géodésique fond de mer française a permis de tirer plusieurs enseignements. En premier lieu, cette campagne a testé et validé pour une application scientifique exigeante, par grands fonds (2400 m), des équipements initialement conçus pour des besoins industriels. Elle a permis d'acquérir des observations réelles pour tester notre méthode de restitution des positions par moindres carrés, jusqu'alors testée uniquement à partir de simulations. Parmi les améliorations à apporter, il faut une meilleure prise en compte des variations temporelles de la célérité dans la colonne d'eau, en intégrant par exemple un paramètre estimé supplémentaire représentant cette variation. Enfin la complexité de rattachements topométriques multi-points sur un navire incite à réduire les distances entre les différents capteurs afin de minimiser les erreurs systématiques sur les bras de levier.

En termes de mise en œuvre, une amélioration significative serait donc la miniaturisation de la plateforme de surface avec l'utilisation d'un drone téléopéré (ASV, *Autonomous Surface Vehicle*) plutôt qu'un navire, telle la plateforme PAMELi récemment acquise par l'Université de La Rochelle (Coulombier et al. 2018). L'utilisation d'un drone présente de nombreux avantages : limiter les bras de levier entre tête acoustique/centrale d'attitude et antenne(s) GNSS, maintenir une position centrale en limitant le bruit acoustique (propulsion électrique), et optimiser la phase d'acquisition (le navire porteur pouvant procéder à d'autres opérations, comme la mesure de profils de célérité). Pour des opérations répétées dans le temps, afin de caractériser le déplacement des fonds marins, l'avantage est aussi de s'affranchir du navire-support (rattachements topométriques, perche pour immerger la tête acoustique) et donc de pouvoir répéter les mesures dans des conditions d'acquisition identiques.

7. Remerciements

Nous tenons à remercier le Capitaine et l'équipage du N/O Téthys II pour leur concours au succès de l'expérience GEODESEA. Nous tenons également à remercier la société Sonardyne Ltd pour la mise à disposition de leur matériel et la participation de leurs ingénieurs Chris Hammersley et Mat

Pow à leur mise en œuvre. Nous remercions l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) pour la mise à disposition et l'installation de la CTD SBE 911, le laboratoire GéoAzur pour la fourniture d'une grille bathymétrique détaillée de la zone de travail, et le Service géomatique de la ville de Nice et la Société Exagone/Teria pour la mise à disposition des corrections de positionnement GNSS. Ce projet a été financé par le CNRS (INSU), l'Infrastructure de Recherche EMSO-France (INSU-CNRS), le laboratoire d'excellence Labex Mer (Brest), et les laboratoires participants (LGO, LIENSs).

8. Bibliographie

- Boucher, C., & Altamimi, Z. (2011). Memo : Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. Observatoire de Paris. <http://etrs89.ensg.ign.fr/>
- Coulombier, T., Ballu, V., Pineau, P., Lachaussée, N., Poirier, E., Guillot, A., et al. (2018). PAMELi, un drone marin de surface pour étudier le littoral de façon interdisciplinaire. In Paralia (Ed.), *XVèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*. La Rochelle. doi:10.5150/jngcgc.2018.038
- Dam, E. B., Koch, M., & Lillholm, M. (1998). Quaternions, interpolation and animation. Technical Report DIKU-TR-98/5, 103, University of Copenhagen.
- Fujita, M., Ishikawa, T., Mochizuki, M., Sato, M., Toyama, S., Katayama, M., et al. (2006). GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth, Planets and Space*, 58(3), 265–275. doi:10.1186/BF03351923
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 5(2), 12–28. doi:10.1007/PL00012883
- Osada, Y., Fujimoto, H., Miura, S., Sweeney, A. D., Kanazawa, T., Nakao, S., et al. (2003). Estimation and correction for the effect of sound velocity variation on GPS/Acoustic seafloor positioning: An experiment off Hawaii Island. *Earth, Planets and Space*, 55(12), 17–20, doi: 10.1186/BF03352464
- Sakic, P., Ballu, V., Crawford, W. C., & Wöppelmann, G. (2018). Acoustic ray tracing comparisons in the context of geodetic precise off-shore positioning Experiments. *Marine Geodesy*, 41(4), 315–330. doi:10.1080/01490419.2018.1438322
- Sakic, P., Ballu, V. & Royer, J.-Y. (2020). A multi-observation least-squares inversion for GNSS-Acoustic seafloor positioning, *Remote Sensing*, 12, 448, doi: 10.3390/rs12030448.
- Spiess, F. N., Chadwell, C. D., Hildebrand, J. A., Young, L. E., Purcell, G. H., & Dragert, H. (1998). Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 108(2), 101–112. doi:10.1016/S0031-9201(98)00089-2