

Etablissement de levé bathymétrique de grande précision par GPS cinématique

Par H. Dekkiche¹, S. Kahlouche¹, H. Abbès¹, M. Kariche²

¹ Centre National des Techniques Spatiales – BP 13 Arzew 31200-ALGERIE.
Unité de recherche et développement URD/AEN-Oran.

ملخص :

تسمح تقنية التموقع الحركي عن طريق أجهزة GPS من تحديد وضعية متحرك بدقة سنتيمترية. في هذا المقال نحن نقترح تجربة تطبيق هذه التقنية لإنجاز مسح لقياس الأعماق البحرية لمنطقة إتساعها 65 000 م² متواجدة في ميناء وهران. تتمثل الطريقة المستعملة بإقران جهاز مستقبل GPS (Ashtech Z-12) مع جهاز سبر (echo-sondeur DESO-11). تمت ملاحظة جيدة لعدة مشاهد في الوقت الحقيقي و تم تحديد وضعيات الهوائي المتحرك بدقة السنتمتر تقريبا، في حين أن تموقع المسابر قد أنجز على حوالي 25 سنتمتر، نتيجة لمزامنة يدوية بدقة 10/1 ثانية بين نوعي قياس (GPS) و قياسات الأعماق. دقة قياسات الأعماق هي حوالي 10 سم. كنتيجة، تحصلنا على نموذج رقمي لسطح الأرض (MNT) دقيق للأعماق.

Résumé :

La technique de positionnement cinématique par GPS permet de déterminer la position d'un mobile avec une précision centimétrique. Dans le présent article, nous proposons de tester l'applicabilité de cette technique pour l'établissement d'un levé bathymétrique d'une zone de 65000m² d'étendue, située au port d'Oran. La méthode employée consiste à coupler un récepteur GPS Ashtech Z-12 avec un équipement de sondage (écho-sondeur DESO-11). Plusieurs profils ont été parfaitement observés en temps réel. Les positions de l'antenne mobile ont été déterminées au centimètre près, alors que le positionnement des sondes a été effectué à 25 cm près, conséquence d'une synchronisation manuelle au 1/10 de seconde de précision entre les deux types de mesures (GPS et Bathymétriques). La précision sur les profondeurs est de l'ordre de 10 cm. Comme produit, nous avons eu un modèle numérique du terrain (MNT) précis du fond marin.

Mots clefs : GPS, écho-sondeur, MNT, Levé bathymétrique.

Abstract :

The technique of kinematic positioning by GPS permits to determine the position of a mobile moving object with a centimetric precision. In the present article, we propose to test the applicability of this technique for the establishment of a bathymetric survey of a zone of 6500 m² of extent, situated to the port of Oran.

The used method consists in compeling a GPS receiver Ashtech Z-12 with an equipment of sounding (echo-sounder DESO-11). Serval Profiles have perfectly been observed in real time. The positions of the moving antenna have been determined to within about a centimetre, whereas the positioning of the soundings has been done to within about 25 cm, consequence of a manual synchronization to the precision of 1/10 of second between both types of measures (GPS and Batymetric). The precision of the depths is of the order of 10 cm. As product, we had a precise numeric model of terrain (MNT) of the sea bed.

I- Introduction:

La détermination précise de la position est en général un problème crucial pour la plupart des applications, particulièrement celles de type maritime, telles que les levés bathymétriques,...etc [1], car les profondeurs mesurées ne peuvent être exploitables que si leurs positions correspondantes, en surface, sont connues avec précision.

La technique GPS (Global Positioning System), en mode cinématique, qui repose sur l'exploitation des mesures de phase permet de déterminer la position d'un mobile en temps réel avec une précision centimétrique [2]-[3]-[4]-[5]; son principe se base sur la fixation du nombre entier de cycles de l'onde porteuse GPS, appelé « ambiguïtés entières ». Une fois que ces ambiguïtés sont déterminées, les mesures de phase commencent à agir comme si elles étaient des mesures ultra-précises de pseudo-distances.

Le positionnement cinématique par GPS s'avère donc, l'outil le plus approprié permettant une bonne localisation pour les besoins d'un levé précis du fond marin.

Afin de montrer les performances du GPS en terme de rapidité et de précision, une expérimentation a été menée en 2002 par le CNTS en coopération avec l'Unité de Recherche et Développement (URD/AEN-Oran). A titre d'application, des observations bathymétriques ont été effectuées dans l'enceinte du port d'Oran selon les étapes suivantes :

- Détermination du point de référence.
- Délimitation de la zone du levé (levé du quai).
- Levé bathymétrique.

L'objectif de cette expérimentation est d'adapter la technique de positionnement cinématique par GPS, pour l'établissement d'un modèle numérique du fond marin.

II- Détermination du point de référence

Une session statique a été observée afin de déterminer le point « Base », situé à quelques centaines de mètres de la zone de travail (la distance entre le point de référence et le mobile peut aller jusqu'à quelques dizaines de kilomètres). Ce point servira par la suite de référence pour le levé bathymétrique; il a été déterminé à partir du point 305Bis situé au CNTS et appartenant au réseau géodynamique international TYRGEONET (Tyrhenian Geodetic Network), ce point est connu dans le système WGS-84 (World Geodetic system) avec une précision absolue de 2 cm.

C'est en fonction des conditions d'observation (longueur de la ligne de base, zone très dégagée...), ainsi que de la précision recherchée (centimétrique), que le PDOP maximum était choisis égal à 4 et le masque d'élévation des satellites égal à 15° (afin de réduire l'effet de l'atmosphère, ainsi que celui de multi-trajet). Les deux récepteurs (305bis et Base) observaient pendant une heure environ, avec une cadence d'enregistrement de 20 secondes.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous; la précision atteinte est de 15 millimètres.

TABLEAU I :
RESULTATS DE LA SESSION STATIQUE

SITE	LAT(°'")	LON(°'")	He(m)	RMS(m)
305bis	35 51 29.768970	-0 18 49.708300	74.7800	0.0000
Base	35 43 54.353358	-0 41 33.154207	55.3200	0.0151

- **SITE** : Nom du site.
- **LAT** : Latitude (WGS-84) exprimée en (degrés, minutes et secondes).
- **LON** : Longitude (WGS-84) (degrés, minutes et secondes).
- **He** : Hauteur ellipsoïdale (WGS-84) (mètres).
- **RMS** : Erreur sur la position (mètres).

III- Levé du quai:

A- Stratégie d'observation :

Avant de commencer un levé cinématique, il faut d'abord faire une initialisation, c'est à dire, déterminer le nombre des ambiguïtés entières de départ. Plusieurs techniques d'initialisation peuvent être envisageables. La plus souvent utilisée et qui a connu un très grand succès est la technique en vol (OTF ou : On -The-Fly) [6]-[7]-[5]. Le mot en vol, veut dire que le récepteur peut déterminer les ambiguïtés et les emporter pendant qu'il est en mouvement.

Vu sa souplesse et sa robustesse, la technique d'initialisation employée est celle en vol (OTF). Le levé a été effectué en temps réel, ce qui a permis de contrôler sur place le temps nécessaire pour initialiser, ainsi que la précision avec laquelle tous les points étaient déterminés.

Les conditions d'observation, ainsi que la dynamique du mobile nous ont conduit à prendre les paramètres suivants :

- Cadence d'enregistrement égale à 5 secondes.
- Élévation des satellites minimale égale à 15°.
- Minimum de satellites observés égal à 5.
- PDOP inférieur à 4.

Le choix d'une cadence de 5 secondes a l'avantage de gagner en espace mémoire du récepteur d'une part, et d'améliorer les performances de l'algorithme utilisé par le logiciel de traitement d'autre part (car avec cette cadence, les mesures sont temporellement moins corrélées) [8].

Une dizaine de points particuliers ont été occupés pendant 30 secondes chacun pour le levé du quai.

B- Analyse des résultats :

D'après le tableau présenté ci-dessous (tableau II), on constate que la précision sur les points observés dépend d'une part, des conditions d'observation (PDOP et nombre de satellites) et d'autre part, de la distance séparant le récepteur mobile de celui de la référence. Par exemple, avec 6 satellites observés, un PDOP de 3,1 et une longueur de ligne de base de 100 mètres environ, une précision de 14 mm en 30 secondes d'occupation a été obtenue. Pour une base de 300 mètres, avec un PDOP de 2,7 la précision est de 13 mm. Puis en enregistre 14 mm pour des bases de 600 m, dans des conditions où le nombre de satellites est 7 et le PDOP égal à 2,8.

TABLEAU II :
POINTS CARACTERISANT LE QUAI

REF	ROV	DIST	RMS	T	SV	PDOP
Base	100	90.550	0.014	0.5	6	3.1
Base	101	96.272	0.014	0.5	6	3.1
Base	102	95.214	0.014	0.5	6	3.1
Base	103	146.790	0.014	0.5	6	3.0
Base	104	321.859	0.013	0.6	7	2.9
Base	105	570.443	0.014	0.5	7	2.8
Base	106	597.589	0.014	0.5	7	2.8
Base	107	598.624	0.014	0.5	7	2.8
Base	108	676.650	0.012	0.5	8	2.4
Base	109	856.781	0.015	0.5	7	2.9
Base	110	861.428	0.033	4.2	7	3.1

- **REF** : Point de référence.
 - **ROV** : Site occupé par le récepteur mobile.
 - **DIST** : Longueur de la ligne de base entre la station de base et le récepteur mobile, exprimée en mètre.
 - **RMS** : Erreur moyenne quadratique sur la position, exprimée en mètres.
 - **T** : Temps d'occupation exprimé en minutes.
 - **SVs** : Nombre de satellites disponibles.
 - **PDOP** : Facteur de dilution de précision de la position (sans unité), il dépend de la géométrie de distribution des satellites.
- La figure I donne l'historique du PDOP et du nombre de satellites observés pendant tout le levé. Les observations ont été effectuées dans de bonnes conditions car on enregistre un PDOP variant entre 2.4 et 3.1, ce qui correspond à un nombre de satellites supérieur à 5.
- L'évolution de l'écart type des trois composantes de la position (x, y, z) est donnée dans la figure II. Avant l'époque 10.41 heures, sa valeur dépasse les 20 mètres, ce qui n'est pas encore déterminées », juste après cette époque la précision devient centimétrique (0.01 mètres); « les ambiguïtés sont donc résolues ».
- Un changement brusque de la précision, est enregistré entre les deux époques 10.8 et 11, ceci s'explique par la mauvaise géométrie qui est due à un saut de cycle sur l'un des satellites (voir figure I).

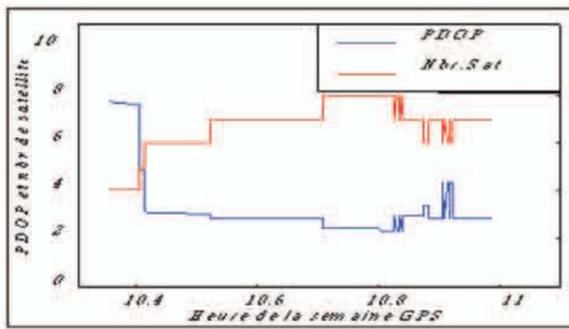


Fig. I : Levé du quai (conditions d'observations).

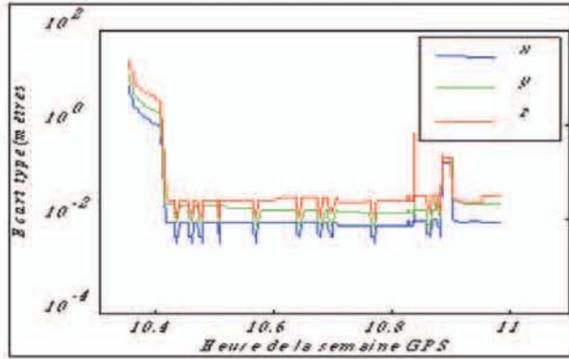


Fig. II : Levé du quai (précision sur les trois composantes de la position).

IV- Levé Bathymétrique :

A- Principe de la mesure :

1) **Présentation de l'écho-sondeur :** Le DESO11 est un écho-sondeur mono-faisceau, conçu pour des opérations commandées par un PC. Il est compatible avec la plupart des transducteurs commerciaux et peut être configuré pour les hautes fréquences (190-225 kHz) ou basses fréquences (28-35 kHz), opérationnel à des profondeurs qui peuvent aller jusqu'à 650 mètres.

Le DESO11 peut être configuré à l'aide d'un logiciel de contrôle compatible avec MS-DOS. Ce logiciel est facile à utiliser et permet à l'écho-sondeur d'être configuré et contrôlé à partir de l'interface PC.

L'écho-sondeur mesure simplement le temps pris aller-retour pour une pulsation, la profondeur est calculée en utilisant l'équation :

$$P = \frac{V \cdot T}{2}$$

Où : P représente la profondeur, V la vitesse et T le temps aller-retour de l'onde sonore.

Il est donc nécessaire de connaître avec précision la vitesse de propagation du son. Cependant, cette vitesse n'est pas constante, elle varie avec la température et la salinité. Dans le cas des océans ouverts, la température et la salinité ne varient pas énormément, tandis que dans le cas des estuaires les variations peuvent être grandes; donc il est important de vérifier la valeur de la vitesse utilisée dans le DESO11 régulièrement.

On note aussi que, si la température diminue à des profondeurs au-delà de 60m la vitesse diminuera aussi.

Puisque la mesure de la profondeur se fait verticalement par rapport au transducteur en acceptant le premier écho réfléchi par le fond marin, dans des circonstances où le fond est incliné, la profondeur mesurée ne correspond pas à la vraie valeur.

L'écart entre ces deux valeurs est fonction de la pente du fond marin (voir Fig. III).

Un effet semblable se produit quand le terrain inférieur est très accidenté.

Cet écart dépend aussi de la fréquence et de la largeur du faisceau utilisés. Aux hautes fréquences (autour de 200kHz) et avec une largeur étroite du faisceau, le fond marin est enregistré plus correctement que dans le cas où on utilise des basses fréquences (autour de 30 kHz) et un faisceau large (voir fig. IV).

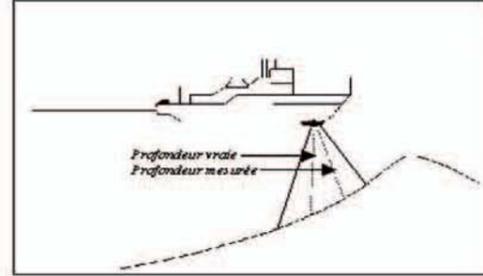


Fig. III : Effet de l'inclinaison du fond.

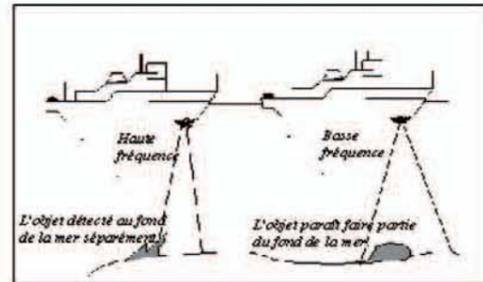


Fig. IV : Effet de la largeur du faisceau et la longueur de la pulsation.

La précision sur la mesure de la profondeur du fond marin dépend aussi de la longueur de la pulsation à cause de l'influence de celle-ci sur la résolution de l'écho-sondeur. Si deux objets sont séparés par une distance inférieure ou égale à la moitié de la longueur de la pulsation, ils ne peuvent pas être distingués.

2) **Mesure de la profondeur :** Le DESO11 permet à l'opérateur de changer les caractéristiques de la pulsation transmise en variant la longueur de la pulsation et la puissance de transmission. La longueur de la pulsation est sélectionnée selon le type du terrain inférieur; pour un fond dur, une courte pulsation est exigée, par contre, dans le cas où le fond est doux, il est préférable d'utiliser une longueur maximale de la pulsation.

Le filtrage des mesures se fait de deux façons, le premier filtre se base sur la largeur de la pulsation. Si la largeur de la pulsation est inférieure au minimum acceptable, l'écho est repoussé.

Le deuxième filtre détermine la profondeur minimum qui sera acceptée comme une mesure valide.

Les échos valides sont utilisés pour calculer la profondeur en se basant sur la vitesse sélectionnée par l'opérateur, cette profondeur est corrigée de ce qu'on appelle : « transducer offset » qui représente la distance comprise entre le niveau de la mer et la position du transducteur. Toutes les profondeurs sont corrigées avant qu'elles ne soient affichées.

B- Stratégie d'observation :

La méthode consiste à utiliser la technique de positionnement cinématique par GPS, pour l'établissement d'un levé bathymétrique précis. Pour cela, nous avons utilisé un écho-sondeur DESO-11, couplé à un récepteur GPS Ashtech-Z12. Les deux équipements embarqués sur un zodiac, pour collecter avec la même cadence (1 seconde) les mesures GPS et bathymétriques.

La durée totale du levé est d'environ 40 minutes, pendant cette période et avec une vitesse moyenne de déplacement de 2.5 m/s (9 Km/h), environ 2200 points ont été observés suivant la distance entre deux profils réguliers consécutifs est d'environ 10 mètres, tandis que celle inter-profil transverses varie de 15 à 18 m, ces derniers servent à densifier et contrôler la qualité des mesures.

Deux récepteurs GPS Ashtech-Z12 ont été utilisés, l'un fixe sur le point « Base », servant de référence, tandis que l'autre a été embarqué avec l'équipement de sondage sur un zodiac. Les deux récepteurs enregistrent simultanément les mesures de phase avec une cadence (fréquence d'enregistrement) d'une seconde.

Les paramètres utilisés pour la configuration des récepteurs pendant le levé sont les suivants :

- Cadence d'enregistrement égale à 1 seconde.
- Elévation des satellites minimale égale à 15°.
- Minimum de satellites observés égal à 5.
- PDOP inférieur à 4.

La cadence d'une seconde est considérée optimale, dans la mesure où l'on cherche à observer le maximum de points tout en préservant les performances du logiciel de traitement et en tenant compte de la capacité en espace mémoire des récepteurs aussi.

Pour minimiser l'effet de multi-trajet qui est considéré très important dans un tel environnement (surface réfléchissante de la mer), un masque d'élévation égale à 15° a été utilisé ; ce masque permet aussi d'atténuer les effets atmosphériques. Le choix de 5 satellites au minimum et d'un PDOP inférieure à 4 permet d'avoir des mesures redondantes, ce qui aide à une initialisation (fixation des ambiguïtés) rapide et fiable d'une part, et améliore significativement la précision sur la détermination instantanée des points observés le long du trajet de l'embarcation.

Les ambiguïtés entières de départ ont été déterminées en vol (OTF); environ 40 secondes d'observation ont été suffisantes pour fixer les ambiguïtés à leurs valeurs correctes.

Cette période d'initialisation dépend de plusieurs facteurs, à savoir; la longueur de la ligne de base, la cadence d'enregistrement, le nombre de satellites observés et leur distribution dans le ciel (facteur PDOP), le type des mesures utilisées et leur qualité, ainsi que du type de traitement adopté [9]-[5].

Grâce à l'utilisation de la radio, la position, la vitesse et l'azimut de l'antenne mobile ont été calculés en temps réel par rapport au point de référence « Base » et les profils ont été parfaitement parcourus. Les corrections différentielles sont transmises au mobile avec une fréquence de 9600 HZ.

Les mesures de profondeurs ont été réalisées par l'écho-sondeur mono-faisceau de type DESO-11, opérant avec une fréquence de 210 KHz; la vitesse de propagation de l'onde sonore a été estimée à 1500 m/s. Le calibrage de cet écho-sondeur a été effectué au début et à la fin du levé, et la précision permise par ce type d'instrument est de l'ordre de 10 cm.

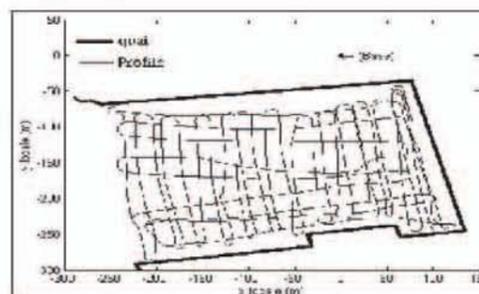


Fig. V : Profils parcourus pendant le levé bathymétrique.

C- Synchronisation des deux types de données :

Suite à l'impossibilité de faire une synchronisation automatique entre les deux types de donnée (GPS et bathymétriques), qui est intrinsèque à la nature du matériel utilisé (DESO-11), nous avons effectué, en première étape, plusieurs tops manuellement, en introduisant des identificateurs qui ont permis par la suite de déterminer l'instant exact d'enregistrement de la mesure GPS, et de la profondeur correspondante.

Après traitement des données GPS, les deux types de données (position GPS et profondeurs) sont combinés, en moyennant les écart enregistrés entre les différents instants de mesures (GPS et bathymétriques).

Cette méthode a permis une synchronisation au dixième de seconde de précision, ce qui a impliqué une précision de 25 cm sur le positionnement en surface des sondes.

D- Analyse des résultats :

La méthode utilisée repose sur le traitement des doubles différences des mesures de phases des deux fréquences. Pour une résolution rapide et fiable, la combinaison (L1-L2 ou Wide-lane) a été utilisée, elle se caractérise par une longueur d'onde relativement grande (86 cm), ce qui facilite la résolution des ambiguïtés, car d'une part, le nombre de combinaisons candidates incluses dans le volume de recherche des ambiguïtés devient réduit, et d'autre part, cette combinaison est moins affectée (en cycle) par l'ensemble des erreurs affectant la mesure de phase [10].

Le levé a été effectué dans de bonnes conditions, ce qui est bien illustré dans la figure VI. Une valeur du PDOP inférieure à 3 et un nombre de satellites variant entre 7 et 8 sont enregistrés.

La figure VII comprend deux parties distinctes, la partie correspondant à la phase d'initialisation et celle correspondant à la phase après initialisation où les ambiguïtés entières sont résolues. Avant la résolution des ambiguïtés, l'écart type sur les trois composantes de position est de quelques mètres. Juste après la fixation des ambiguïtés et plus précisément à l'instant 82.69 heures, une précision centimétrique est enregistrée, elle est restée la même pour toute la trajectoire. La précision sur la composante verticale est relativement moins bonne si on la compare avec la position horizontale (24 mm sur la composante verticale et 9 mm sur celles horizontales), ceci est dû au facteur DOP exprimant la configuration géométrique des satellites dans le ciel.

Dans la figure VIII, une représentation en trois dimensions du fond marin montre que les profondeurs varient entre 6 et 13 mètres. Elles sont déterminées avec une précision décimétrique. Le couple (X,Y) représente les coordonnées cartésiennes UTM (Universal Transverse Mercator) du modèle ellipsoïdique WGS-84 (World Geodetic System), tandis que Z est le résultat de la différence entre la hauteur ellipsoïdique et la profondeur fournie par l'écho-sondeur.

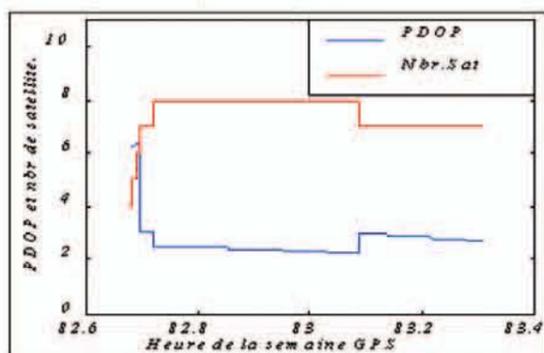


Fig. VI : Levé bathymétrique (conditions d'observation).

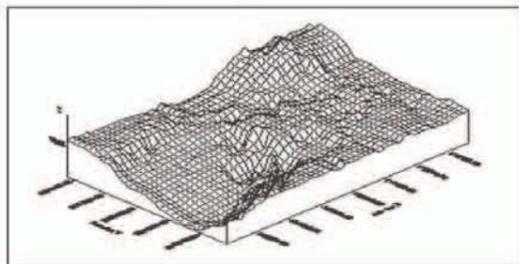


Fig. VII : Fond marin en 3D.

V- Conclusion et suggestions:

Les résultats obtenus à travers cette expérimentation qui consiste à établir un levé bathymétrique précis par GPS et qui sont présentés dans ce présent article, démontrent que la méthode de positionnement cinématique par GPS garantit une détermination de la position d'un mobile en mer avec une précision centimétrique. Cette méthode est aussi très efficace pour le levé de détails, tel que le quai délimitant la zone où le levé bathymétrique a été effectué. Elle donne de bons résultats, point de vue rapidité et précision.

La combinaison de cette méthode avec un système de mesurage de profondeurs (écho-sondeur), a permis d'établir un modèle numérique du fond marin avec une précision de l'ordre de 25 cm sur la position. Cette précision est implicitement liée au type de synchronisation (manuel) entre les deux types de mesures (GPS et bathymétriques). La précision sur les mesures des profondeurs est directement liée aux performances du matériel utilisé; le DESO-11 est un écho-sondeur mono-faisceau qui permet une précision de l'ordre de 10 cm.

Pour préserver la précision centimétrique fournie par le système de positionnement GPS et améliorer la qualité des mesures de profondeurs à la fois, il est nécessaire d'assurer une synchronisation automatique avec une précision meilleure que le dixième de seconde et de mesurer des profondeurs avec une précision meilleure que les 10 cm.

L'utilisation de la technique de positionnement cinématique par GPS couplée à un écho-sondeur permet de déterminer la forme du fond marin et de le localiser avec grande précision, ce qui peut être un indice très important pour identifier et caractériser les structures actives marines.

Aussi, la précision centimétrique sur la composante verticale, permise par la méthode cinématique, peut être exploitée dans d'autres applications de type maritimes telles que, la détermination du niveau moyen de la mer, la détermination précise du zéro hydrographique,... etc.

VI- Références Bibliographiques:

- [1] Congyu Liu. 1993. "Precise GPS positioning in the marine environment". Master thesis. UCGE Reports Number 2055, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- [2] C. Lachapelle, M. E. Cannon, and G. Lu, "A comparison of P code and high performance for on the fly ambiguity resolution C/A code GPS receivers", Bulletin Géodésique, (1993) 67: 185-192.
- [3] Bernard Hofman-Wellenhof and Benjamin W. Remondi, "The antenna exchange : One aspect of high-precision GPS kinematic survey". GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying. Proceedings of the international GPS-Workshop. Darmstadt, April 10 to 13, 1988, pp. 261-277.
- [4] M. Anzidei, "Rapide Bathymetric Survey in Marine Volcanic Areas : A Case Study in Panarea Area", 2000 Elsevier Science Ltd, phy. Chem. Math (A), Vol. 25, No. 1, pp. 77-80, 2000.
- [5] H. Dekkiche, " Modélisation du GPS cinématique pour les applications maritimes ". Thèse de magistère. CNTS. 2002.
- [6] Fotopoulos. "Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations". Master thesis. UCGE Reports Number 20142, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2000.
- [7] Dariusz Lapucha, John E. Chance and Associates Inc. Lafayette, LA, USA. "Real Time GPS Kinematic Surveying Whith OTF Ambiguity Resolution". Artificial Satellites, Planetary Geodesy N° 21, Vol. 29 N° 01 - 1994.
- [8] PNAV. "Precise Differential GPS Navigation and Surveying". Software User's Guide, Ashtech, CA USA 94086. 1998.
- [9] Shawn D. Weisenburger. April, 1997. "Effect of Constraints and Multiple Receivers for On-The-Fly Ambiguity Resolution." Master thesis, UCGE Reports Number 20109, Geomatics